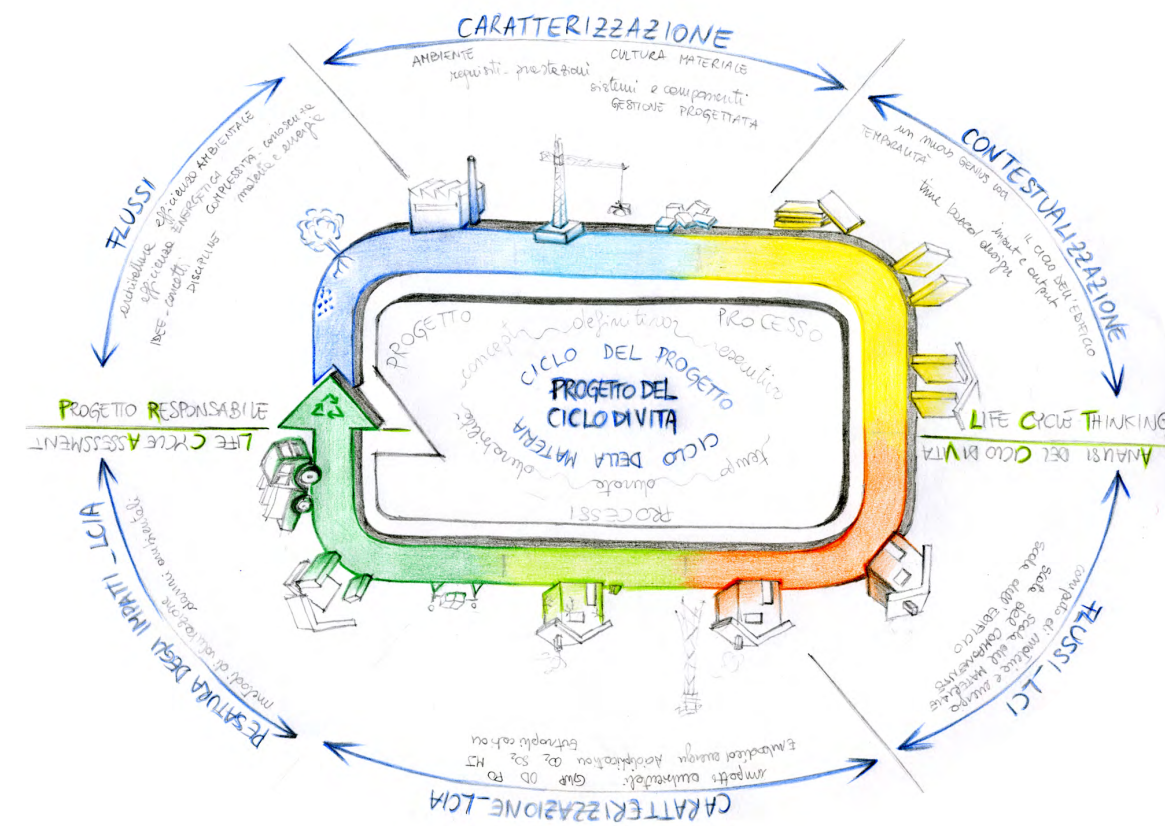


***LIFE CYCLE DESIGN IN ARCHITETTURA***

## Progetto e Valutazione di Impatto Ambientale dalla Materia all'Edificio



Il testo si struttura seguendo le fasi del progetto, così come le fasi del ciclo di vita. La ciclicità e i continui feedback tra i livelli intermedi dell'indagine - alla scala del progetto, della costruzione e della materia - intrecciano e collegano le diverse parti della trattazione: la prima è un affresco sull'evolversi della pratica progettuale oltre l'eco-efficienza, la seconda traccia il quadro metodologico della LCA e i successivi capitoli raccontano puntuali scenari applicativi alla scala dell'edificio e dei suoi componenti.

# LIFE CYCLE DESIGN IN ARCHITETTURA



TECNOLOGIA

ARCHITETTURA  
INGEGNERIA  
SCIENZE

politecnica



*a Pietro e Andrea*

Il testo restituisce riflessioni ed approfondimenti di un percorso di ricerca che ha affrontato, negli anni dal Dottorato di Ricerca ad oggi, tematiche relative alle architetture eco-sostenibili e alla valutazione degli impatti ambientali di materiali e tecnologie nella progettazione, costruzione, gestione e manutenzione di edifici, e relative ai processi di innovazione tecnologica e materiale, al fine di analizzare l'evoluzione nell'impiego di materiali tradizionali, dettata dalle nuove esigenze prestazionali e normative, e gli scenari applicativi di nuovi materiali nel settore edilizio. Un percorso alimentato anche dalla partecipazione a ricerche finanziate:

- *Percorsi e gestione delle informazioni tecniche per la promozione e il controllo dell'innovazione nei materiali e nel progetto di architettura*, Ricerca cofinanziata MURST anno 2005, (coord. nazionale Attilio Nesi; coord. .u.o. Politecnico di Milano Andrea Campioli); titolo della ricerca dell'unità di Milano *Membrane e scocche per l'architettura diffusa* (2005/2007);

- *Individuazione del profilo ambientale di nuovi materiali applicati in architettura: il caso delle membrane di involucro in ETFE* (tutor A. Campioli, A. Zanelli). Borsa post-dottorale per un anno finanziata da Fondazione F.lli Confalonieri (2007-2008);

- *Energia incorporata, variabili di durata e decadenza prestazionale* all'interno del progetto di ricerca *Energia per costruire, energia per abitare. Ottimizzazione energetica e ambientale di soluzioni tecniche di involucro in laterizio*, finanziata da ANDIL, (responsabile della ricerca A. Campioli; 2008/2010)

- *S(P)EEDKITS - Rapid deployment of shelters: Life cycle design of shelters and optimization of service-life and recycling scenarios of kits*, all'interno del progetto di ricerca S(P)EEDKITS finanziato da EU dentro il Frame Program 7, THEME [SEC-2011.4.2-3], [*Rapid deployment of shelters, facilities and medical care resources following a major disaster - Integration Project*] (coordinatore partner Politecnico A. Zanelli) (2012/2016);

- *Ricerca preliminare allo sviluppo di un componente innovativo di involucro/copertura in film fluoropolimerici multilayer ad alta efficienza e simulazioni di prestazione*, finanziato da Canobbio S.p.A. (2009/2011).

Alcune sperimentazioni didattiche, le supervisioni alle tesi di laurea e le occasioni di confronto con colleghi in seminari e convegni hanno assunto un ruolo non secondario in questo percorso.

L'idea di restituire in una pubblicazione i risultati prodotti è maturata in un momento in cui il processo progettuale è sempre più una fatica culturale oltre che operativa, con la finalità di tratteggiare atteggiamenti possibili per farlo riaffermare oltre ogni specialismo, lavorando sul fronte della cultura e della tecnica da un lato, e sulla consapevolezza critica verso la gestione e valutazione delle problematiche ambientali dall'altro.

In merito rivolgo il mio primo ringraziamento a Andrea Campioli e Alessandra Zanelli per il sostegno nelle diverse fasi della preparazione del testo e per l'incoraggiamento a raccogliere ed a finalizzare i risultati di tante ricerche.

Ad Andrea Campioli, nella sua qualità di "maestro", va un ringraziamento particolare, per le sue sempre pronte indicazioni e per l'indispensabile ricchezza scientifica e metodologica che sa condividere e trasmettere con grande passione.

Sono debitrice verso Alessandra Zanelli per il suo contributo quotidiano alla mia "crescita", per avermi supportato e trasmesso il coraggio e l'entusiasmo verso il mestiere che facciamo e verso occasioni di sperimentazione d'avanguardia e transdisciplinari.

Desidero ringraziare i docenti e i colleghi del dipartimento ABC e, in particolare dell'Unità di Ricerca SPACE (coord. Prof. Claudio Molinari) che hanno contribuito alla mia formazione.

Ringrazio Anna Mangiarotti, a cui devo l'inizio della mia passione nella ricerca in Tecnologia dell'architettura e verso gli aspetti costruttivi della progettazione architettonica, e Marisa Bertoldini, generosa nell'infondere la tenacia necessaria ad individuare quel piano globale del fare scientifico in cui si ampliano i riferimenti culturali dell'indagine e si assiemano gli specialismi tecnici, necessari ma non sufficienti.

Un "grazie" davvero sentito va a Paolo Neri (ENEA) per avermi affiancato con grande umanità ed entusiasmo nella conoscenza e nell'insegnamento prezioso della metodologia Life Cycle Assessment.

Un ringraziamento particolare va a Laura Carrera, Lucia Ticozzi e Stefano Aliprandi, "incontri" preziosi che hanno collaborato con le loro giovani idee al testo, oltre che materialmente, con un attento e scrupoloso lavoro redazionale e di elaborazione grafica.

Infine grazie a tutti coloro che sono per me ogni giorno un supporto meraviglioso.

## INDICE

<b>Prefazione di Andrea Campioli.....</b>	<b>I</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>V</b>
<b>1. Nuovi approcci per il progetto di architettura ambientalmente responsabile.....</b>	<b>1</b>
1.1. Flussi.....	2
1.2. Caratterizzazione.....	17
1.3. Contestualizzazione.....	35
<b>2. Analisi del ciclo di vita e metodologia <i>Life Cycle Assessment</i> a supporto del progettista.....</b>	<b>53</b>
2.1. Procedure e dati per il computo dei flussi metabolici dell'edificio.....	57
2.2. La caratterizzazione degli impatti ambientali del sistema edificio.....	73
2.3. I metodi di valutazione per la pesatura del danno ambientale.....	80
2.4. Strategie di applicazione in architettura.....	87
<b>3. Ciclo di vita del componente e ottimizzazione nell'uso della materia.....</b>	<b>93</b>
3.1. Paradigma della leggerezza per la riduzione degli impatti ambientali nei processi industriali e nelle scelte tecniche del progetto.....	93
3.2. Il ciclo di vita dei cuscini pneumatici in etfe per l'involucro trasparente.....	96
3.3. Obiettivo e contenuto della valutazione comparativa.....	107
3.4. Il metodo di valutazione di impatto ambientale.....	108
3.5. LCA alla scala del materiale e confronto tra vetro, polycarbonato, pvc crystal e etfe.....	108
3.6. LCA alla scala del subsistema edilizio e confronto tra due sistemi di copertura trasparenti.....	112
3.7. Interpretazione dei risultati.....	119
<b>4. Ciclo di vita dell'edificio e contenimento dei consumi energetici.....</b>	<b>121</b>
4.1. Scenari di forma e durata per l'individuazione di soluzioni tecniche ottimali alla specificità dei progetti.....	121
4.2. Obiettivo dell'applicazione dell'analisi energetica LCA.....	123
4.3. Dati di riferimento sulla vita utile degli edifici e dei loro componenti.....	123
4.4. I casi di studio.....	125
4.5. Approccio metodologico alla valutazione degli impatti energetici.....	130
4.6. I risultati.....	145
4.7. Interpretazione dei risultati.....	157
<b>5. Ciclo di vita dell'edificio e riduzione degli impatti ambientali.....</b>	<b>159</b>
5.1. Scenari di innovazione tecnica, reversibilità e riciclo a fine vita nella scelta progettuale consapevole di materiali e componenti per la costruzione.....	159
5.2. Finalità di un'analisi LCA completa nella fase di progetto dell'edificio.....	162
5.3. LCA alla scala del subsistema tecnologico delle chiusure verticali esterne.....	167
5.4. LCA alla scala dell'edificio.....	194
5.5. Il valore minimo degli impatti ambientali di costruzione e di gestione dell'edificio.....	202
5.6. Considerazioni conclusive.....	204

LIFE CYCLE DESIGN IN ARCHITETTURA

<b>6. Conclusioni.....</b>	<b>205</b>
<i>Riferimenti bibliografici.....</i>	<i>219</i>
<i>Fonti delle illustrazioni.....</i>	<i>233</i>
<i>Indice dei nomi e dei luoghi.....</i>	<i>235</i>

## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1-1:	Diagramma del convenzionale ciclo di vita degli edifici .....	7
Fig. 1-2:	Schema concettuale per una progettazione del ciclo di vita (LCD) e per la prevenzione dell'inquinamento ambientale in architettura.....	12
Fig. 1-3:	I flussi di sostanze in input e output nel "ecosistema" dell'edificio .....	12
Fig. 1-4:	Un ciclo di vita sostenibile degli edifici.....	13
Fig. 1-5:	Metodo di applicazione della <i>Life Cycle Design</i> .....	14
Fig. 1-6:	Un trasferimento del modo di pensare, passando dal business tradizionale agli esiti ambientali positivi .....	16
Fig. 1-7:	Stralcio dalla norma ISO 15686 – parte 6 – Fasi del ciclo di vita, origine dei dati e processo di pianificazione della vita utile.....	28
Fig. 1-8:	Prestazione nel ciclo di vita delle costruzioni.....	29
Fig. 1-9:	Durabilità e manutenzione nel ciclo di vita dell'edificio.....	29
Fig. 1-10:	Stralcio della tabella della durata di vita allestita dall'Associazione Svizzera Inquilini (MV) e dall'Associazione dei Proprietari Immobiliari .....	32
Fig. 1-11:	Casi evocativi di superamento di ogni identità locale e rispetto per il luogo e le proporzioni: sono l'edificio del Casinò Campione d'Italia, arch. Mario Botta e edificio in Francia.....	37
Fig. 1-12:	Grafico di confronto tra gli impatti ambientali provocati dei processi di fine vita, senza considerare la generazione di prodotti e energie secondari con il riciclo e la termovalorizzazione: tutto l'impianto di riciclo per effettuare il trattamento di un materiale necessita di macchiari, grandi quantità di energie per funzionare e provoca emissioni in atmosfera.....	43
Fig. 1-13:	Valutazione del confronto fra discarica e riciclo e termovalorizzazione con Edip96, quali trattamenti a fine vita di un kg di polistirene: la discarica presenta un maggior impatto ambientale rispetto agli altri due processi di trattamento a fine vita, che considerano il vantaggio di ottenere un prodotto secondario dal processo di trasformazione della materia .....	44
Fig. 2-1:	Schema operativo della procedura di analisi del ciclo di vita secondo la normativa della serie 14040 .....	57
Fig. 2-2:	Visualizzazione tipica di una voce da banca dati <i>Inventory of Carbon &amp; Energy</i> (ICE) – Version 1.6a .....	61
Fig. 2-3:	Informazioni ambientali di prodotto riportate nella banca dati anglosassone <i>Environmental Profiles</i> del BRE di materiali da costruzione, prodotti e sistemi edilizi....	61
Fig. 2-4:	Informazioni ambientali di un prodotto in laterizio riportate nella banca dati francese INIES – <i>Declaration Environnementale et Sanitaire Conforme A La Norme NF P 01-010</i>	62
Fig. 2-5:	Stralci con la visualizzazione dei dati ambientali riportati nell'"Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 TEXLON® System - Vector Foiltec, Nowofol, Dyneon - Declaration number EPD-VND-2011111-E", sistema d'involucro a membrana pneumatica in etfe .....	64
Fig. 2-6:	Stralcio dei dati ambientali riportati nell'Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD®) del coppo in cotto, Vs 0.0 del 03.01.07, Cotto San Michele Srl.....	65
Fig. 2-7:	Stralci con la visualizzazione dei dati ambientali riportati nell'"Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025" Exterior plaster (organic) Sto Aktiengesellschaft Declaration number EPD-STO-2011331-E, intonaco esterno.....	65

Fig. 2-8: Grafico di confronto tra alcune voci prese da banche dati diverse, tutte riferite alla produzione di un kg di lana di vetro. Tra le voci <i>Glasswool</i> con borax e <i>Glasswool</i> ci sia una differenza sul risultato del 8%; tra la seconda e la terza voce un margine del 21% e tra la prima e la terza un impatto differente per il 14%. L'incidenza degli impatti è attribuibile all'uso di combustibili fossili (colore viola) all'emissione di sostanze dannose alla salute umana, nella categoria <i>Respiratory inorganics</i> (colore rosso).....	70
Fig. 2-9: Grafico di confronto tra alcuni mix energetici contenuti nelle banche dati del codice SimaPro, presi come campione. La dimostrazione mette in luce come gli esiti di una valutazione degli impatti ambientali sia fortemente collegata al vettore energetico nazionale o locale, quindi dipendente dalla localizzazione dell'insediamento produttivo.....	70
Fig. 2-10: Esempio di grafico della caratterizzazione dei danni ambientali di una valutazione LCA di un sistema di involucro, in cui si visualizzano in una scala % i contributi agli impatti ambientali, suddivisi per categorie di impatti, dei componenti dell'involucro.....	76
Fig. 2-11: Due grafici che mettono in evidenza i risultati (differenti) della valutazione LCA degli impatti ambientali con due metodi diversi (Ecoindicator nel primo caso e EPS 2000 nel secondo caso) di una comparazione di 4 involucri ad alta efficienza energetica: se nel primo metodo (olandese) l'uso del suolo (in arancione) emerge come impatto di un certo peso, nel secondo metodo lo stesso indicatore non emerge quasi (linea marrone).....	86
Fig. 3-1: Diagramma di flusso per la catena di produzione dell'etfe e dei cuscini pneumatici.....	98
Fig. 3-2: <i>Mangrove Hall</i> ( <i>Burgers' Zoo</i> di Arnheim, Paesi Bassi) è uno dei primi esempi di applicazione dei cuscini in etfe in architettura (1982).....	101
Fig. 3-3: Copertura dell'atrio centrale del <i>Chelsea and Westminster Hospital</i> , Londra (1990), dettagli di alcuni difetti emergenti dopo 20 anni d'uso senza particolare manutenzione....	102
Fig. 3-4: Lucernari della copertura dell'aeroporto <i>Stansted</i> , Londra (progetto Norman Foster & Partner, 1991).....	103
Fig. 3-5: Pensiline di sosta dell'autostazione presso l'aeroporto <i>Stansted</i> di Londra (progetto di Norman Foster & Partner, 2007) realizzate con cuscini pneumatici in etfe.....	104
Fig. 3-6: Cupola a cuscini pneumatici di etfe della <i>Regenswald</i> ad Hannover (progetto Gordon Wilson, 1999).....	104
Fig. 3-7: Edificio residenziale <i>Social Housing</i> nel quartiere <i>Kronsberg</i> ad Hannover (progetto Willen Associates Architekten, 1998).....	105
Fig. 3-8: I quattro materiali semilavorati trasparenti e i relativi sistemi di copertura oggetto della comparazione.....	109
Fig. 3-9: Grafico dei confronto dei risultati in % di impatto ambientale della LCA comparativa per la produzione di 1kg di componenti trasparenti da costruzione, per sei categorie di impatto.....	110
Fig. 3-10: Grafico dei confronto dei risultati in % di impatto ambientale della LCA comparativa per la produzione di 1mq di componenti trasparenti da costruzione, per sei categorie di impatto.....	112
Fig. 3-11: Sistemi di chiusura orizzontale trasparenti del Complesso <i>Holzstrasse</i> a Linz e del <i>Social Housing</i> a Hannover.....	113
Fig. 3-12: Viste del <i>Complesso Holzstrasse Building Complex</i> a Linz, arch. Thomas Herzog, 2001	114
Fig. 3-13: Pianta del <i>Complesso Holzstrasse Building Complex</i> a Linz, progetto arch. Thomas Herzog, 2001.....	114
Fig. 3-14: Viste del <i>Complesso Social Housing</i> ad Hannover, progetto Willen Associates Architekten, 2000.....	115
Fig. 3-15: Pianta del <i>Complesso Social Housing</i> ad Hannover, progetto Willen Associates Architekten, 2000.....	115

## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 3-16: Disegni di dettaglio nel calcolo degli impatti ambientali del <i>Complesso Social Housing</i> ad Hannover.....	116
Fig. 3-17: Disegni di dettaglio degli elementi in considerazione oggetto del computo nel calcolo degli impatti ambientali del <i>Complesso Holzstrasse Building Complex</i> a Linz.....	116
Fig. 3-18: Impatti ambientali dell'analisi LCA del sistema di copertura a cuscini pneumatici in etfe del complesso edilizio di Hannover.....	118
Fig. 3-19: Impatti ambientali dell'analisi LCA del sistema di copertura a lastre di vetrocamera del complesso residenziale di Linz.....	118
Fig. 3-20: Confronto tra risultati degli impatti ambientali dei due edifici.....	119
Fig. 4-1: Le due tipologie edilizie: la casa unifamiliare monopiano e l'edificio a torre pluripiano....	126
Fig. 4-2: Localizzazione degli edificio, dati dimensionali per le tipologie edilizie, caratteristiche termiche dei sub sistemi d'involucro, dimensioni delle superfici disperdenti.....	126
Fig. 4-3: Le sei soluzioni di involucro applicate alle tipologie edilizie.....	128
Fig. 4-4: Componenti coinvolti nelle stratificazioni d'involucro.....	129
Fig. 4-5: Rielaborazione dalla banca dati ICE nel foglio di calcolo per la valutazione delle tipologie d'involucro.....	137
Fig. 4-6: Risultati dell'analisi dell'energia incorporata delle sei tipologie d'involucro.....	146
Fig. 4-7: Confronto fra le energie incorporate dei sei edifici unifamiliari monopiano, normalizzate sulla superficie utile.....	148
Fig. 4-8: Confronto fra le energie incorporate dei sei edifici a torre, normalizzate sulla superficie utile.....	150
Fig. 4-9: Casi di studio: confronto e rapporto (per es. 1:2,86 per la 1A) tra i valori di energia incorporata EE e di fabbisogno di energia primaria FEP in 60 anni, normalizzati sulla superficie utile (sopra-caso dell'edificio unifamiliare, sotto-caso dell'edificio a torre)....	151
Fig. 4-10: Valutazione energetica LCA delle case unifamiliari per una vita utile di 60 anni.....	156
Fig. 4-11: Valutazione energetica LCA degli edifici a torre per una vita utile di 60 anni.....	156
Fig. 5-1: Pianta dell'edificio 'Casa famiglia per minori' a Lodi.....	165
Fig. 5-2: Sezione longitudinale dell'edificio.....	166
Fig. 5-3: Sistema costruttivo assemblato a secco.....	166
Fig. 5-4: Le fasi del cantiere.....	167
Fig. 5-5: Le soluzioni costruttive assemblate a secco ai fini della reversibilità.....	167
Fig. 5-6: Le tipologie d'involucro codificate con le lettere A per la prima e B C D per le successive.....	168
Fig. 5-7: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo Ecoindicator99.....	182
Fig. 5-8: Il diagramma di valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo EPS2000.....	183
Fig. 5-9: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo Edip96: il danno totale vale 536 Pt dovuto per il 99.63% a <i>PUR rigid foam P</i> ; il danno è dovuto per il 82.64% a <i>Ecotoxicity water chronic</i> e per il 8.33% a <i>Ecotoxicity water acute</i> .....	184
Fig. 5-10: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per l'involucro tipo A con il metodo Edip96 ( <i>only resources</i> ): il danno totale vale 0.00435 Pt dovuto per il 37,93% al consumo di <i>Zinc</i> (zinco), per il 28,96% al consumo di <i>Lead</i> (piombo) e per il 15,13% al consumo di <i>Natural gas</i> (gas naturale). Inoltre il danno totale è dovuto per il 52,87% a CM_Profilo di acciaio zincato (produzione del profilo distanziatore per la posa del rivestimento esterno).....	185
Fig. 5-11: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro B con il metodo EcoIndicator99.....	186
Fig. 5-12: Il diagramma della valutazione per ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro C con il metodo EcoIndicator99.....	187



Fig. 5-13: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) del processo per il tipo d'involucro D con il metodo EcoIndicator99.....	188
Fig. 5-14: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Ecoindicator 99.....	190
Fig. 5-15: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo EPS2000.....	192
Fig. 5-16: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Edip96.....	193
Fig. 5-17: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Edip96 ( <i>only resources</i> ).....	194
Fig. 5-18: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo ( <i>single score</i> ) con il metodo Ecoindicator99 degli impatti relativi all'intero ciclo di vita dell'edificio per un periodo di 25 anni.....	199
Fig. 5-19: Il diagramma della valutazione con il metodo Ecoindicator99 dell'LCA dell'edificio per un ciclo di vita ( <i>service life</i> ) di 50 anni.....	200
Fig. 5-20: Il diagramma della valutazione con il metodo Ecoindicator99 dell'LCA dell'edificio per un ciclo di vita ( <i>service life</i> ) di 75 anni.....	201
Fig. 5-21: Tabella e diagramma di confronto degli impatti ambientali con il metodo Ecoindicator99 per le soluzioni tipo A con valori di trasmittanza termica U diversi.....	203
Fig. 6-1: <i>Aura House</i> , ottimizzazione della fase di produzione con involucro monostrato.....	210
Fig. 6-2: Padiglione tessile pneumatico, realizzato per il Museo delle Arti Applicate a Francoforte	210
Fig. 6-3: <i>Wall House</i> , esempio di integrazione tra leggerezza ed efficienza energetica in relazione con il contesto climatico.....	211
Fig. 6-4: <i>Container City</i> , realizzazione containerizzata sperimentale costruita nell' <i>East Indian Dock</i> di Londra.....	212
Fig. 6-5: <i>SpaceBox</i> , soluzione temporanea realizzata con un sistema costruttivo leggero e prefabbricato.....	213
Fig. 6-6: <i>Micro-Compact Home</i> , piccolo modulo abitativo, progettato come un oggetto di design	214
Fig. 6-7: <i>Soltag energy Housing</i> , caso eccellente di ottimizzazione energetica della fase d'uso.....	215
Fig. 6-8: <i>More with less</i> , esempio di integrazione impiantistica e di ottimizzazione della fase d'uso.....	215
Fig. 6-9: <i>Casa Zero Energy</i> , prototipo residenziale, esempio di integrazione fra attenzioni progettuali bioclimatiche e sistemi passivi.....	216
Fig. 6-10: <i>Villa Welpeloo</i> , edificio residenziale, costruito quasi completamente con componenti e materiali di riuso.....	217

## INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1-1: Tabella con indicatori ambientali e i dati numerici di alcuni materiali da costruzione.....	32
Tab. 1-2: Tipologie di obsolescenza degli edifici.....	47
Tab. 1-3: Classi di durata di vita quali requisiti minimi per gli edifici.....	49
Tab. 1-4: Tempi di vita utile indicative per opere e per sistemi e prodotti.....	50
Tab. 1-5: Indicazioni sulla durata di vita minima per i componenti (anni).....	51
Tab. 1-6: Tabella con le durate di vita richieste agli edifici in Canada.....	51
Tab. 2-1: Esempio di <i>data sheet</i> da compilare.....	59
Tab. 2-2: Confronto fra differenti valori di energia incorporata per la produzione di 1 kg di laterizio secondo alcune fonti da letteratura e banche dati.....	67
Tab. 2-3: Descrizione dei processi di produzione di due voci da banca dati per il materiale "Lana di vetro".....	72
Tab. 2-4: Tabella con valori di impatto medi relativi ad un anno di produzione industriale a livello globale.....	77
Tab. 3-1: LCI del processo di produzione di un kilogrammo di granuli (materiale di base) e di un film (semilavorato) di etfe.....	106
Tab. 3-2: Risultati della valutazione LCA della fase di produzione di 1 kg di componenti trasparenti da costruzione, svolta con il software SimaPro V7.1, secondo gli indicatori EPD.....	110
Tab. 3-3: Risultati della valutazione LCA della fase di produzione di 1 m <sup>2</sup> di componenti trasparenti da costruzione, svolta con il software SimaPro V7.1, secondo gli indicatori EPD.....	111
Tab. 3-4: Risultati della analisi LCA comparativa tra il sistema vetrato di Linz e il sistema pneumatico di Hannover.....	119
Tab. 4-1: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio contro terra.....	127
Tab. 4-2: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio di copertura.....	127
Tab. 4-3: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio interpiano.....	127
Tab. 4-4: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato di mattoni con isolamento termico.....	133
Tab. 4-5: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata.....	133
Tab. 4-6: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni faccia a vista.....	133
Tab. 4-7: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro monostrato, isolamento esterno e rivestimento a tavole di cotto assemblate a secco....	133
Tab. 4-8: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato intonacato.....	134
Tab. 4-9: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro con sistema costruttivo leggero e totalmente "a secco".....	134
Tab. 4-10: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato di mattoni con isolamento termico.....	138
Tab. 4-11: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata.....	138
Tab. 4-12: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni faccia a vista.....	138
Tab. 4-13: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro monostrato, isolamento esterno e rivestimento a tavole di cotto assemblate a secco.....	138

## LIFE CYCLE DESIGN IN ARCHITETTURA

Tab. 4-14: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato intonacato.....	134
Tab. 4-15: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro con sistema costruttivo leggero e totalmente "a secco".....	139
Tab. 4-16: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio di copertura piana.....	139
Tab. 4-17: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio controterra.....	139
Tab. 4-18: Energia incorporata negli elementi tecnici costituenti i serramenti vetrati.....	140
Tab. 4-19: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio interpiano nella tipologia edilizia a torre.....	140
Tab. 4-20: Risultati dal modello di calcolo con i valori di energia incorporata per i subsistemi dell'edificio unifamiliare monopiano.....	148
Tab. 4-21: Risultati dal modello di calcolo con i valori di energia incorporata per i subsistemi dell'edificio a torre pluripiano.....	149
Tab. 4-22: Risultati della valutazione energetica del ciclo di vita delle case unifamiliari con sei diverse soluzioni d'involucro per una vita utile di 60 anni.....	155
Tab. 4-23: Risultati della valutazione energetica del ciclo di vita degli edifici a torre con sei diverse soluzioni d'involucro per una vita utile di 60 anni.....	155
Tab. 5-1: Modifiche negli spessori degli isolanti per ottenere la stessa prestazione termica.....	169
Tab. 5-2: Massa superficiale di un m <sup>2</sup> di involucro per le quattro diverse tipologie.....	169
Tab. 5-3: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A...	170
Tab. 5-4: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B...	171
Tab. 5-5: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C...	172
Tab. 5-6: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D...	173
Tab. 5-7: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A.....	174
Tab. 5-8: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B.....	175
Tab. 5-9: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C.....	175
Tab. 5-10: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D.....	176
Tab. 5-11: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A	177
Tab. 5-12: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B	177
Tab. 5-13: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C	178
Tab. 5-14: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D	178
Tab. 5-15: Stralcio esemplificativo della tabella d'inventario per l'involucro di tipo A.....	179
Tab. 5-16: Caratterizzazione degli impatti ambientali con Eco-indicator99 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	189
Tab. 5-17: Valutazione degli impatti ambientali con Eco-indicator99 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	190
Tab. 5-18: Caratterizzazione degli impatti ambientali con EPS2000 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	191
Tab. 5-19: Valutazione degli impatti ambientali con EPS2000 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	191
Tab. 5-20: Caratterizzazione degli impatti ambientali con Edip96 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	192
Tab. 5-21: Valutazione degli impatti ambientali con Edip96 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.....	193
Tab. 5-22: Caratteristiche degli strati dei componenti costituenti la soluzione del solaio di copertura F.....	196

#### INDICE DELLE TABELLE

Tab. 5-23: Caratteristiche degli strati dei componenti costituenti la soluzione del solaio controterra E.....	196
Tab. 5-24: Risultati delle verifiche con l'inserimento di una caldaia a gas come impianto di riscaldamento.....	197
Tab. 5-25: Confronto dei fabbisogni energetici fra la caldaia a gas e la pompa di calore come impianto di riscaldamento.....	197
Tab. 5-26: Variazione dello spessore dello strato isolante e delle relative trasmittanze termiche per la verifica del minimo impatto ambientale tramite una LCA dei consumi di materia e di energia nella vita utile ( <i>service life</i> ) di un edificio.....	203



## PREFAZIONE

*di Andrea Campioli*

«Tutto nel mondo sta dando risposte, quel che tarda è il tempo delle domande». Con queste parole uno dei protagonisti del romanzo di José Saramago *Memoriale del convento* (1) descrive l'inadeguatezza di un mondo che ha perso ogni capacità di introspezione critica. Queste stesse parole possono essere chiamate a esprimere la situazione di disagio che la progettualità contemporanea vive nei confronti di una tecnica che in modo sempre più pervasivo sembra occupare ogni spazio: nel momento stesso nel quale un nuovo problema si delinea all'orizzonte la tecnica sembra già avere una soluzione disponibile. In questo scenario la capacità di comprendere il significato ultimo dell'attività progettuale tende a essere marginalizzata: come soleva ripetere Cedric Price (2) «Technology is the answer, but what was the question?», sottolineando l'esistenza di un'ineliminabile interdipendenza tra la risposta e la domanda e mettendo in luce come, talvolta, l'urgenza di porre rimedio a una situazione critica faccia dimenticare quale è il problema che deve essere risolto.

Questa difficoltà si presenta con connotati ancora più marcati se guardiamo con disincanto il modo con cui il problema delle istanze ambientali è affrontato nei processi di trasformazione dei territori, delle città e degli edifici che abitiamo. In questo ambito infatti la questione della compatibilità ambientale sembra essere diffusamente considerata un problema superato, grazie alla possibilità estesa di disporre di prodotti e tecniche costruttive dichiarati ambientalmente efficienti e di efficaci strumenti per la valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici e finanche di intere porzioni di città. E' vero, su questo fronte molto è stato fatto in questi ultimi anni, anche in un contesto come quello italiano che certo non brilla per intraprendenza. Molto ancora deve però essere fatto, soprattutto per quanto riguarda il progetto. La sostenibilità ambientale deve offrire la spinta propulsiva per avviare un concreto e tangibile miglioramento del modo con cui abitiamo il pianeta.

Il rapporto dialettico tra tecnica e ambiente ha costituito un terreno di confronto sul quale il progetto di architettura si è sistematicamente confrontato. Possiamo anzi affermare che il progetto di architettura è uno dei luoghi privilegiati nei quali, a partire da epoche molto lontane e in contesti molto diversificati, si sono sperimentate modalità sempre originali per comporre la dicotomia, molto radicata nella cultura occidentale, tra naturale e artificiale. Occorre altresì osservare come in questi ultimi anni le tematiche ambientali nell'ambito del progetto di architettura abbiano assunto, sia sul piano della riflessione teorica, sia sul fronte della operatività una inedita centralità e al contempo si deve prendere atto di come gli aspetti legati alla sostenibilità ambientale condizionino in modo sempre più rilevante le scelte di progetto alle diverse scale, da quella ampia delle trasformazioni urbane e territoriali, fino a quella di dettaglio dei materiali e dei prodotti da costruzione.

Ci troviamo così in una situazione ricca di sollecitazioni che spingono la progettualità nella direzione di un radicale ripensamento dei processi di trasformazione del costruito e che assumono come riferimento fondativo degli interventi che si intraprendono il principio della sostenibilità ambientale. Ma allo stesso tempo siamo calati in una realtà nella quale a una diffusa dichiarazione di interesse per la salvaguardia dell'ambiente raramente corrispondono azioni coerenti con gli obiettivi esplicitati ed efficaci nei loro esiti. Si deve impedire che la pervasività mediatica con cui la questione ambientale viene proposta finisca con l'offuscare la consapevolezza critica di chi progetta e costruisce, con il risultato di trasformare quella che avrebbe potuto essere una grande opportunità per migliorare le tecniche con cui costruiamo e gli spazi nei quali abitiamo, in una ennesima sottomissione alle cieche logiche del profitto e del mercato che già hanno caratterizzato molti recenti interventi speculativi in cui nostri modi di costruire e di abitare sono stati dequalificati.

In tal senso occorre affermare con chiarezza e decisione la centralità del progetto di architettura, muovendo da un'attenta riflessione intorno ad alcune declinazioni particolarmente rilevanti della questione ambientale.

All'interno delle logiche e delle dinamiche che oggi governano i processi di trasformazione del territorio, alle diverse scale, la questione della sostenibilità ambientale si pone in termini ambigui e per certi versi paradossali. Alla diffusa presa di coscienza maturata nei contesti geopolitici ormai consapevoli della finitezza delle risorse in grado di continuare ad alimentare i processi di sviluppo in atto, si contrappone l'applicazione di un modello di crescita aggressivo da parte di molti Paesi che solo di recente si sono affacciati alla fase di sviluppo industriale. Se poi si delimita l'ambito di interesse alla scala edilizia e al settore delle costruzioni, si può osservare come, anche nei contesti sensibili nei confronti delle ricadute ambientali degli interventi attuati, si configurano comportamenti spesso contrapposti: da un lato si persegue una ricerca tecnologico-industriale esasperata che, in nome della sostenibilità ambientale, propone modelli e soluzioni la cui compatibilità con l'ambiente in termini di risorse impiegate e di impatti generati in fase di produzione, uso e dismissione è tutta da verificare; dall'altro lato vi sono esperienze orientate alla valorizzazione dei materiali, delle tecniche e delle soluzioni costruttive della tradizione, che si pongono molto criticamente rispetto alle potenzialità residue dell'innovazione tecnologica sul fronte della compatibilità ambientale del costruire.

In questo scenario il ruolo del progetto non può che essere confuso. In un celeberrimo saggio pubblicato a metà degli anni Sessanta, Giulio Carlo Argan, disquisendo sulla crisi dell'arte e più in generale della società contemporanea, si chiedeva se «tutto quello ch'è stato fosse progetto o destino, se l'uomo abbia costruito secondo i propri disegni o se, credendo di farlo, non abbia fatto qualcosa ch'era già detto e deciso» (3).

Se applichiamo queste considerazioni allo specifico del progetto di architettura e del settore delle costruzioni si può osservare come il percorso evolutivo che ha caratterizzato il costruire nell'età industriale e post-industriale abbia finito molto spesso con il connotarsi in termini di acritico assoggettamento a un destino governato dalle leggi del profitto e del mercato.

Ma la sostenibilità in architettura deve essere progetto, non destino. Al di là delle bandiere, dei marchi, delle etichette, degli slogan, ciò che ci deve oggi preoccupare è il perseguimento di una progettualità fondata sulla competenza tecnica e scientifica e sulla consapevolezza culturale, una progettualità capace di costituire scenari di trasformazione credibili e concretamente compatibili con l'ambiente. Per far questo occorre una comprensione ampia

del progettare e del costruire, intesi come attività sistemiche e interrelate all'interno delle quali produzione, uso e dismissione costituiscono aspetti inscindibilmente connessi.

L'orizzonte della sostenibilità chiama in causa, infatti, fenomeni di altissima complessità, sia sul fronte delle trasformazioni sociali, economiche e culturali, sia per ciò che riguarda le implicazioni ecologiche dell'attività edilizia nella sua ampia estensione territoriale e temporale, sia per quanto riguarda gli strumenti e le tecniche a cui fare riferimento. Su quest'ultimo fronte, in particolare, si rende oggi necessario contrastare la tendenza a una sconsiderata semplificazione dei fenomeni complessi di cui si è detto, perché è proprio questo approccio semplicistico la causa delle interpretazioni spesso banalizzate e talvolta radicalmente sbagliate.

Il libro di Carol Monticelli sviluppa il tema della sostenibilità ambientale proprio in questa prospettiva complessa, assumendo la considerazione dell'intero ciclo di vita dei manufatti edilizi, siano essi materiali, componenti o edifici, come ineludibile orizzonte di riferimento e la misurazione dei consumi di energia e di risorse e degli impatti che si determinano lungo il ciclo di vita (Life Cycle Assessment) come strumento principe per valutare con rigore e fondatezza scientifica la concreta sostenibilità delle scelte progettuali.

La ricca articolazione del libro, frutto della messa a sistema del lavoro svolto dall'autrice in quasi dieci anni di ricerca sul fronte della valutazione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni, descrive con dovizia di dettagli le potenzialità e i limiti delle metodologie e degli strumenti Life Cycle Assessment (le risposte di Saramago), ma non perde altresì occasione per riflettere sugli obiettivi che un progetto ambientalmente consapevole deve necessariamente traguardare (le domande).

D'altra parte al mondo della ricerca universitaria spetta compito di mettere a fuoco risposte sempre più precise affinché la salvaguardia dell'ambiente non sia soltanto uno slogan. Come afferma Gianfranco Bologna a proposito della formula dello sviluppo sostenibile: «Mantenere nella vaghezza i pur difficilissimi contorni concettuali di questa formula e non confrontarsi con i problemi concreti che derivano dall'attuazione della sostenibilità nei nostri processi di sviluppo significa procedere a un'azione ingiustificata dal punto di vista scientifico e scorretta dal punto di vista sociale, economico e politico» (4). Ma alla ricerca universitaria spetta anche il compito di difendere strenuamente una visione del rapporto tra progettazione e sostenibilità ambientale che sappia comprendere tutta la ricchezza problematica che lo connota, opponendosi alle riduttive semplificazioni che spesso gli interessi di parte impongono.

Il lavoro di Carol Monticelli costituisce un interessante contributo in questa duplice direzione.

(1) SARAMAGO, J. (1982), Memorial do convento, Caminho, Lisboa.

(2) PRICE, C. (1984), A summertime Breeze, AA Files, n. 5, pp. 69-74.

(3) ARGAN, G. C. (1965), Progetto e destino, Il Saggiatore, Milano.

(4) BOLOGNA, G. (2008), Manuale della sostenibilità. Idee concetti, nuove discipline capaci di futuro, Edizioni Ambiente, Milano.

Milano, 30 settembre 2013





## INTRODUZIONE

L'impostazione del libro nasce dall'idea di percorrere la complessità del progetto da un lato, e lo specialismo della valutazione dell'impatto ambientale dall'altro, alla ricerca di connessioni e sovrapposizioni utili per quanti oggi vogliano cimentarsi con un approccio sostenibile alla progettazione, basato sulla metodologia *life cycle*.

Nella prima parte, un approfondimento teorico tratteggia tre livelli interpretativi sui quali è impostato questo duplice sguardo alla complessità del progetto e alla valutazione ambientale: il livello del progetto, il livello della materia e dell'edificio, il livello del tempo. In *primis* viene indagato il rapporto tra il percorso della progettazione ambientale responsabile e le variabili 'materia', 'energia', 'tempo' per la sostenibilità delle costruzioni; in secondo luogo, si delineano le relazioni tra il percorso costruttivo, i materiali e prodotti e le implicazioni di danno ambientale determinate dalla loro scelta da parte del progettista; infine si approfondisce un nuovo rapporto tra architettura e tempo, tra edificio e durata di vita, tra materiali, componenti e loro durabilità.

Il testo entra poi nell'articolazione delle caratteristiche, delle potenzialità e dei limiti della metodologia di valutazione di impatto ambientale *Life Cycle Assessment* (LCA), con gli indicatori ambientali, i metodi di pesatura degli impatti, per la comparazione e la scelta di materiali e soluzioni tecniche adeguate al contesto del progetto e per la analisi del ciclo di vita di prodotti e edifici.

Sia l'affresco teorico e quello metodologico sulla LCA sono da considerarsi funzionali alla comprensione della successiva parte del testo, ovvero la serie di casi-studio che vedono l'applicazione da parte dell'autrice della analisi LCA alle diverse scale del prodotto, del subsystema e dell'edificio. Tali casi applicativi vogliono offrire un contributo originale, di prima mano, alla tematica della valutazione di impatto ambientale delle costruzioni, offrendo strategie per un approccio progettuale attento agli impatti ambientali del costruito e nuovi punti di vista, che scaturiscono proprio dalla considerazione delle valutazioni ambientali fatti su casi applicativi specifici.

I casi studio mostrano tre differenti declinazioni dell'analisi LCA. In un primo caso si percorre il ciclo di vita della materia con la comparazione del profilo ambientale di materiali trasparenti usati per soluzioni tecnologiche di copertura, fino a caratterizzare gli impatti; l'interlocutore dei risultati dell'analisi è, da punti di vista differenti, il produttore, se si indaga la scala del materiale, il progettista, se la scala del componente. Nel secondo esempio si valuta il ciclo di vita dell'edificio, l'energia consumata e la durata, tramite un bilancio energetico di due tipologie edilizie e sei soluzioni d'involucro, i cui risultati suggeriscono come gli esiti di una valutazione possano cambiare sostanzialmente a seconda delle fasi del ciclo di

vita considerate nell'analisi. Una terza applicazione infine approfondisce il bilancio ambientale completo LCA di un edificio per la residenza e tecnologie d'involucro innovative, in cui gli esiti di impatto del ciclo di vita dell'edificio sono valutati con diversi metodi di pesatura; un caso esemplificativo della procedura nel caso ci si trovi in fase progettuale di fronte alla scelta di alternative di componenti per poter compiere responsabilmente delle scelte.

Il testo si struttura seguendo le fasi dell'analisi del ciclo di vita, così come le fasi del progetto, tuttavia la ciclicità e continui feedback delle relazioni fra livelli intermedi dell'indagine, sia alla scala del progetto, sia alla scala della costruzione, che a quella della materia, riallacciano e intrecciano le diverse parti della trattazione. Una lettura intrecciata fra la specificità della metodologica di valutazione del ciclo di vita e il processo progettuale è percorribile riflettendo su alcuni termini caratterizzanti la metodologia di valutazione degli impatti ambientali. Come si indagano il ciclo della materia e dei prodotti, i 'flussi' in ingresso e in uscita, la loro 'caratterizzazione' rispetto agli indicatori e da ultimo la 'contestualizzazione' tramite la valutazione, anche nel progetto di architettura si può ripercorrere tale sequenza sul ciclo del progetto.

L'individuazione della catena dei flussi (*Flow chart*) di materia e energia in entrata e in uscita nell'organismo edilizio è una delle prime operazioni per impostare una valutazione degli impatti ambientali del ciclo di vita LCA. Questo termine fa metaforicamente pensare ai primi momenti progettuali, in cui i flussi di sensazioni, di conoscenza, di informazioni preliminari (impalpabili, forse non quantificabili) scorrono nella mente dell'architetto.

La fase di caratterizzazione, nella sequenza metodologica della *Life Cycle Assessment* (ISO 14040) consente di individuare e pesare all'interno di una singola categoria di impatto (esaurimento delle risorse, salute umana, conservazione dell'ambiente) il tipo di danno relativo alla sostanza emessa o alla risorsa usata in un processo produttivo con il profilo ambientale degli impatti di un prodotto come risultato. L'obiettivo della caratterizzazione degli impatti ambientali di un processo, legato a un prodotto, sia esso un materiale, un componente o un sistema costruttivo, è di avere delle informazioni per poter prendere decisioni in fase progettuale sui componenti e sulle tecnologie da adottare nella costruzione di un edificio eco-efficiente, che riduca al minimo la sua impronta ambientale.

Il termine 'contestualizzazione', associato alla procedura metodologica LCA per individuare gli impatti ambientali di un materiale, un componente, un sistema costruttivo e dell'edificio, significa valutazione e pesatura tramite metodi basati su indici ambientali degli impatti ambientali recedentemente caratterizzati: vengono moltiplicati per i "fattori peso", che esprimono l'importanza relativa attribuita alle differenti tipologie di impatto, a seconda della criticità ambientale. È una fase di interpretazione dipendente dalla particolare sensibilità a determinati temi da privilegiare, dal contesto, dalla differente cultura, dal diverso approccio ai problemi ambientali. Contestualizzare significa considerare una realtà, un problema rapportandolo al contesto fisico, ambientale, storico, sociale e economico nel quale è maturato e si è manifestato. Nell'affrontare il progetto e la realizzazione di una architettura, le scelte progettuali, legate al contesto ambientale, materiale, temporale, vanno oculatamente calibrate, poiché costituiscono e forgianno le caratteristiche di un edificio. È indispensabile contestualizzare il progetto per definirne la forma, che dipende dalla conformazione del territorio e dalle caratteristiche climatiche e ambientali.

## **Il rapporto tra progetto di architettura e paradigmi energetico-ambientali**

In risposta alle esigenze di sostenibilità ambientale, il progetto di architettura contemporaneo, oltre alla determinazione reciproca di forma, funzione e tecnica fin dai primi momenti concettuali sta cambiando approccio e deve farsi carico di sorvegliare le diverse tappe del ciclo di vita oltre la realizzazione. Occorre preventivamente indagare l'origine materica delle parti dell'edificio e i processi realizzativi di materiali e componenti, tutti i processi dell'industria edilizia precedenti alla realizzazione progettuale, poi la fabbrica della costruzione, la gestione dell'edificio in uso e anche prefigurare possibili interventi manutentivi nel periodo utile, il fine vita e quello delle sue parti. Al progetto, con grande responsabilità del progettista, non è più concesso di fermarsi al cantiere, ma gli compete la previsione della durata dell'edificio, considerando fin dalle prime fasi le tecnologie e i materiali con le loro peculiarità fisiche e tecniche. Pianificare il ciclo di vita dell'edificio e dei suoi componenti, e contemporaneamente consumare meno materiali e meno energia grigia, usare elementi riciclati o riciclabili, far consumare meno un edificio, comporta una rivisitazione comporta un approccio al progetto integrato di nuovi paradigmi.

Nella progettazione ambientale energia, ambiente e tempo diventano ulteriori e prioritarie variabili del progetto di un edificio eco-efficiente: un livello di qualità più complessa del progetto di architettura. Si rende necessaria una concezione olistica, affinché l'edificio stesso risulti come un sistema integrato, in cui "nuovi materiali" e "nuove componenti", atti a soddisfare i requisiti di efficienza energetica e ambientale, vengano applicati, rispettando le caratteristiche distributive, funzionali e spaziali richieste e incentivando il perseguimento di soluzioni innovative (formale, volumetrica, dei rapporti fra pieni e vuoti, di interfaccia fra i subsistemi e fra edificio e impianti).

Considerando i nuovi requisiti di un progetto attento alla riconquista dell'equilibrio tra costruito e ambiente, diventa oggetto d'indagine la trasformazione che la progettazione degli edifici sta subendo, sia dal punto di vista formale che dal punto di vista esecutivo e tecnologico.

La volontà modesta è di offrire, attraverso questo contributo, una riflessione critica degli atteggiamenti di ricerca e di metodo che l'approccio ambientale al progetto sta cercando di perseguire, spesso in modo diversificato, per affrontare le urgenze ambientali e il disagio diffuso dell'abitare ormai non più derogabili. Come ricongiungere i motivi della trasformazione con il principio di responsabilità, quale guida per scelte progettuali orientate a finalità sociali riconoscibili e riconosciute, in cui l'esigenza dell'utente prevalga le strategie del profitto?

Ci troviamo di fronte a un panorama edilizio frutto di una scarsa qualità del costruire, che, continua a dominare i cantieri, nonostante sporadici miglioramenti percepibili. Progetto e costruzione hanno vissuto un disequilibrio nel rapporto tra tecnologia e progetto, conseguenza del latitante principio di responsabilità e, il più delle volte, dello scarso controllo nella fase di messa in opera da parte dei progettisti. I risultati sono, oltre al parco edilizio insostenibile per la società, l'ambiente e l'economia, la sfiducia nei confronti della professionalità del settore. Occorre ridare voce al mestiere dell'architetto, nelle sue diverse declinazioni, fargli riacquisire centralità nella soluzione dei problemi, valore civile e sociale e, soprattutto, occorre anche che l'architetto ri-assuma le sue responsabilità in rapporto con un nuovo "tempo", un nuovo "ambiente" e una società mutevole.

Occorre che l'architettura, da architettura senza architetto in molti casi o architettura straordinaria in altri casi, ritorni ad essere architettura "civile": non serve dare spettacolo,

praticare una bulimia formale o tecnologica secondo modelli fuorvianti, serve un'architettura di servizio per la qualità del vivere quotidiano, risolutiva di problemi condivisi senza tralasciare in ogni caso il valore derivante dagli aspetti espressivi e tecnologici. Considerare l'architettura più come formalizzazione, spesso incompresa, che funzionalizzazione gli ha gli ha riservato negli ultimi decenni un ruolo marginale nei processi di trasformazione della società e dell'ambiente.

In questa prospettiva il progetto deve assumere nuovamente il carattere di un "pensare altrimenti", rappresentare un'intenzione, un voler affrontare i problemi e proporre nuove soluzioni possibili, e non essere mero calcolo, geometria e ingegneria (Bertoldini, Campioli, 2009). La ragione ambientale si aggiunge con privilegio necessario alle interpretazioni del progetto e, turbando la tradizione, si impone nella teoria e nella prassi, ridando all'architettura una centralità perduta nell'equilibrio tra natura e costruito, con il valore aggiunto di contributi transdisciplinari attinti da campi disciplinari e tecnici differenti. Sta all'architetto la capacità sensibile di interpretare i nuovi paradigmi, di applicare coerentemente le nuove priorità dell'approccio ecologico e di saper integrare nuovi componenti e dispositivi perseguendo anche un equilibrio estetico ponderato sul contesto storico e culturale.

Sembra oggi una novità o un'innovazione parlare di Progettazione ambientale nel senso di considerazione della riduzione del peso dell'organismo architettonico, secondo un principio progettuale etico-costruttivo di contenimento o calibro delle quantità di materia e energia necessaria per la costruzione e l'uso, in relazione alla funzione e al contesto dell'edificio; tuttavia il concetto è stato alla base delle sperimentazioni, "forse fuori tempo" per la sua epoca, di Buckminster Fuller. Non è oggi solo una questione di leggerezza, paradigma sicuramente significativo, ma anche di considerazione preliminare della durata dell'architettura, e delle sue parti, e previsione del consumo ad essa associato: una, la durata, rievoca il paradigma alla base della cultura post-industriale, inteso non più come resistenza/permanenza, ma come previsione e programmazione del suo tempo di vita utile e di esercizio, l'altro è una delle principali istanze del nostro contesto contemporaneo globalizzato, quella della riduzione dei consumi energetici e della ricerca di fonti rinnovabili.

Tuttavia per parlare di innovazione nell'attualità del XXI Secolo, nominando la Progettazione ambientale, occorre guardare oltre. Non è più sufficiente mirare al contenimento, alla riduzione dei pesi e ad architetture passive, adeguati per innescare la corsa ai ripari nel breve termine, occorre invece trapiantare la progettazione di architetture attive, autoregolanti e rigenerative, forse futuristici oggi, ma sostenibili in un tempo a medio-lungo termine. Concepire l'edificio come un organismo biologico, che adatti le proprie funzionalità rispetto ai cambiamenti ambientali per sopravvivenza nell'ecosistema, è un obiettivo molto ambizioso per lo scenario attuale, dove effettivamente in molti contesti si è ancora lontani dall'idea dell'uso di fonti rinnovabili, delle case passive o a zero emissioni. Tuttavia è giusto che la ricerca si muova in tale direzione: i suoi effetti concreti sulla pratica progettuale si manifesteranno in maniera diffusa in un tempo non così immediato. Purtroppo la più ampia parte della pratica progettuale corrente e i requisiti della domanda dimostrano ancora in molti casi carenza nella acquisizione del problema ambientale e nelle possibilità di risposta. Dove si intravede una presa di coscienza delle necessarie azioni progettuali per costruire architetture eco-efficienti, ci si imbatte in due atteggiamenti: quello che si piega alle leggi del mercato immobiliare e veicola l'informazione ambientale, tramite etichette, certificazioni, indicatori, classi energetiche, per ottenere il massimo profitto, quello che sposa e traduce

con onestà i principi progettuali (spesso solo alcuni) per ottenere edifici eco-efficienti, non solo sulla carta, ma lungo l'intero ciclo di vita utile.

La durata, quindi il tempo, e i consumi, quindi l'ambiente, sono le premesse di una nuova cultura e un nuovo metodo del progetto di architetture sensibili al luogo, in cui le ragioni dell'ambiente non devono essere interpretate come vincoli, ma come opportunità nel più ampio senso architettonico e non limitato a aspetti parziali (tecnologici e di componentistica). I problemi di un ritrovato equilibrio con l'ambiente, di un nuovo modo di utilizzare lo spazio e di organizzazione estetica su nuovi rapporti potrebbero essere proprio l'epocale occasione di sperimentazione e il campo d'azione dell'architettura del XXI Secolo (Friedman, 2011).

Formalmente parlando, si sta assistendo anche a un cambiamento di gerarchie e a un rinascimento in forma contemporanea dello spirito del luogo, in cui l'ambiente influenza il progetto, la forma nasce come combinazione fra esigenze del contesto, traendo da esso la maggior utilità, e dell'utenza e le proporzioni compositive dell'involucro (il termine facciata è oggi superato) devono interfacciarsi con i nuovi dispositivi tecnologici o i nuovi spessori di materiale per il contenimento dei consumi e degli impatti ambientali. Si progetta una forma che non deve solo rispondere in modo astratto ai principi estetici, ma a una serie di problemi già ampiamente documentati nel trattato vitruviano. Il progetto di un edificio, per esempio, pensato in rapporto al sole non è solamente un edificio su cui sovrapporre i pannelli solari per generare energia, ma un edificio in cui l'apporto solare è affrontato in termini compiutamente progettuali, insieme a orientamento, schermature e sistemi di ombreggiamento (ottimizzati tramite strumenti di calcolo in relazione agli angoli di esposizione), aggetti e rientranze e dove anche gli stessi pannelli rappresentano parte di un pensiero articolato sull'edificio, cercando di soddisfare molte esigenze progettuali tra cui, semplicemente, la loro stessa integrazione formale nel complesso. Non è cosa semplice ridare l'equilibrio formale rispettando i tanti dettami normativi e tecnici, richiesti con il recepimento delle Direttive Europee 2002/91/CE *Energy Performance Building Directive*, (EPBD) sull'efficienza energetica degli edifici e RECAST 31/2012/CE sui "quasi *Zero Energy Building*", spesso troppo lassisti o troppo rigidi, soprattutto quando si vogliono ottenere prestazioni energetiche di prima classe o targhe ecologiche: recenti realizzazioni di edifici passivi o a basso consumo energetico appaiono spesso del tutto discutibili sul piano formale e di proporzioni dei volumi e degli elementi compositivi delle facciate, tuttavia probabilmente sono classificati A+++ o hanno acquisito il certificato *LEED Gold* (immagine di esempio). Sono rari i progetti in cui le scelte ambientali si sviluppano parallelamente alla concezione tipologica – spaziale dell'edificio, poiché la tendenza attuale di considerare il progetto con consapevolezza ambientale non è ritenuta ancora una necessità, ma uno dei modi possibili di progettare. L'architetto deve sviluppare una nuova consapevolezza nella soluzione di un'armonia di linee e proporzioni, oltre all'abilità coscienziosa nel rispettare i requisiti normativi e nel soddisfare gli indicatori ambientali degli strumenti di valutazione degli impatti ambientali, senza far prendere il sopravvento a tecnologie e componenti, tali da far sembrare l'edificio un impianto alla scala edilizia. Di conseguenza, per evitare parzialità nella considerazione delle istanze ambientali e per perseguire obiettivi ambiziosi nella gestione della complessità ambientale nel progetto e nel settore delle costruzioni, è necessario progettare l'edificio non come oggetto in sé, ma come sistema di un organismo urbano e ambientale, fatto di tanti sotto-sistemi, caratterizzato da un ciclo di vita, più o meno lungo, e non solo dalla fase d'uso. Quindi un approccio sistemico e un approccio al ciclo di vita emergono come nuovi motori del progetto.

### **L'approccio *Life Cycle Thinking***

Lo spostamento di attenzione nelle scelte progettuali deriva dall'evoluzione interpretativa del problema ambientale e dal nuovo approccio di intervento: da valutazione degli impatti ex post, con il fine di limitare i danni e i rischi ambientali di opere e processi già esistenti, ad una ex ante, attraverso prevenzione e ricerca di concetti e strategie volti ad analizzare un edificio e le sue parti a monte del processo di realizzazione, con lo scopo di progettare un sistema eco-efficiente o a basso impatto ambientale. Si tratta di un approccio diverso dalla prassi che ha caratterizzato l'edilizia degli ultimi decenni, particolarmente attento a un "sistema ambiente" complesso e allo stesso tempo delicato, spesso sfruttato al limite e erroneamente considerato inalterabile: sono noti i cambiamenti subiti dall'ecosistema, in seguito alle azioni umane, e le ripercussioni visibili, causate da queste trasformazioni, quali il riscaldamento terrestre, i cambiamenti climatici, l'acidificazione dei suoli, l'eutrofizzazione delle acque, l'assottigliamento dello strato di ozono, ecc. L'architettura non rimane estranea a questo quadro di problematiche: è una manifestazione delle attività umane. Dunque progettare e costruire secondo i criteri della sostenibilità, significa sostanzialmente confrontarsi con i principi che rendono praticabile l'equilibrio tra uso delle risorse ed impatto ambientale.

La progettazione ecologicamente responsabile è stata acquisita in molti settori scientifico-disciplinari dell'architettura ed è attualmente oggetto di studi e ricerche da parte del settore scientifico della tecnologia dell'architettura e del settore della produzione edilizia. In questi ambiti vengono considerati in particolare due aspetti distinti della problematica: da un lato la definizione di strategie di progettazione ambientale di edifici e insediamenti, dall'altro gli impatti ambientali di prodotti edilizi e dell'edifici nel suo complesso al fine di orientare le strategie progettuali. Si manifesta quindi un cambio di gerarchia tra i paradigmi del progetto, che va ripensato e calibrato su nuove basi e scenari di una visione nel tempo della vita del manufatto costruito. Il tema non è solo il progetto dell'edificio, ma della vita di un edificio, in cui la dimensione temporale e spaziale sono fondamentali e vanno declinate alle diverse scale del costruito. Il ruolo della durata e della programmazione della manutenzione negli edifici è determinante sul ciclo di vita fin dalle prime fasi del progetto; sono aspetti strettamente legati alle tecnologie impiegate, a loro volta conseguenze del contesto ambientale: quale tecnologia per quale durata? Quale tecnologia per quale contesto?

A supporto del rinnovamento in corso del processo progettuale il *Life Cycle Thinking* LCT è un criterio attraverso il quale è possibile compiere azioni o assumere decisioni con consapevolezza rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio, del processo e del prodotto in esame. Può essere definito come una corrente di pensiero che paragona un manufatto o un processo a un organismo vivente, che nasce, cresce, muore (Aa. Vv., 2004). Tramite tale similitudine la vita di un edificio e del suo processo è considerabile come una sequenza di fasi: quella di progettazione, quella di estrazione e lavorazione delle materie prime, quella dell'imballaggio e distribuzione agli usi finali, quella della costruzione e della messa a sistema dei singoli componenti, quella dell'uso e di gestione e, per ultima ma non ultima, la fase di fine vita, trasformabile nella prima fase di nuove forme di vita, tramite il riuso e il riciclo. Il ciclo di vita di un organismo o di un processo interagisce con l'ambiente circostante e l'interazione con sistemi adiacenti è assimilabile a una catena di flussi con input (sostanze per le lavorazioni, energia, lavoro umano, tecnologia, denaro, etc.) e output (sostanze di scarto dalle lavorazioni, energie da perdite di rete, materiali di scarto, etc.), in stretto contatto e scambio con la sfera ambientale, sociale e economica.

Tale approccio legato all'analisi del ciclo di vita ha origine verso la fine degli anni Sessanta negli Stati Uniti e viene importato in Europa nel decennio successivo (Baldo, 2005), periodo in cui, per far fronte della prima crisi energetica e del consumo di risorse, alcuni ricercatori compresero come l'unico percorso scientificamente efficace fosse indagare il cammino compiuto dalle materie prime costituenti un determinato componente, a partire dall'estrazione fino ai processi di lavorazione, trasporto e futura dismissione. I primi studi effettuati, codificati come *Resource and Environmental Profile Analysis* erano finalizzati a caratterizzare il ciclo di vita di alcuni materiali impiegati in importanti produzioni industriali comparandoli con una produzione simile, cercando di comprendere i processi in uso e proporre migliorie per ridurre gli impatti sull'ambiente (è il caso della Coca Cola Company, pioniera nell'applicare tale approccio nel confrontare diversi packaging): *REthink*, *REpair*, *REplace*, *REuse*, *REduce*, *REcycle*.

Prima di approdare tardivamente e in tempi recenti nel settore delle costruzioni, il LCT è stato ampiamente acquisito dall'industria, applicando i concetti al *Life Cycle Management* e sfruttando l'opportunità di un business finalizzato a migliorare l'immagine pubblica e la propria prestazione sostenibile, ovvero quella dei propri prodotti sulla sfera ambientale, sociale, ed economica. Solo un accenno ad alcuni casi esemplari: l'azienda 3M ha attivato nel 1975 un programma 3P (*Pollution Prevention Pays*) che nel 2007 ha contato circa 400 prodotti su cui è stato applicato, portando alla riduzione di 2,5 tonn. di CO<sub>2</sub>, ha introdotto in tutti i suoi settori l'LCM nel 1997 e, su questo principio, ha messo sul mercato nel 2009 una serie di prodotti "verdi" per la pulizia della casa frutto di un progetto oculato del ciclo di vita per la riduzione degli impatti ambientali; la Procter & Gamble dal 2000 si impegna per migliorare la vita dei suoi consumatori allo sviluppo di prodotti e servizi innovativi, come il detersivo Ariel, che consente di raggiungere lo stesso pulito a temperature inferiori, e al raggiungimento entro il 2012 degli obiettivi del comunicato di Copenaghen di riduzione dell'emissione dei gas serra, delle quantità di energia, acqua e rifiuti; la Nokia Corporation tramite l'LCT ha focalizzato l'interesse nel risparmio energetico, studiando modalità per un uso corretto del caricabatterie per telefoni cellulari con ridotto fabbisogno di energia una volta completata la carica e grazie alla segnalazione del livello di carica raggiunto; da ultimo la Toyota Motor Corporation ha praticato la politica di riduzione degli impatti e dei trasporti in fase di produzione e lavoro del 1990 per offrire, nell'ottica LCT, auto ibride, con un'elevata eco-efficienza e una ridotta dipendenza in fase d'uso da fonti non rinnovabili.

Per le costruzioni tale approccio si insedia e viene accettato con il ritardo nel recepimento dell'innovazione tipico del settore. Emerge dapprima l'esigenza di valutare le caratteristiche dei materiali edilizi, quindi il LCT viene recepito dalla filiera produttiva, e con lentezza e, spesso, con azioni ancora non ben perimetrate metodologicamente si riconosce l'approccio all'analisi del ciclo di vita dei sistemi costruttivi e degli edifici come l'unica strada percorribile per comprendere la ricchezza dei problemi che pervade il progetto dell'edificio eco-efficiente. Possiamo affermare che molte aziende, in particolare quelle consapevoli del proprio carico nocivo all'ambiente, si stanno muovendo (fin dagli anni Settanta), anche sotto obbligo di accordi internazionali sulla riduzione degli impatti ambientali, a perseguire obiettivi di una produzione più controllata; altre si stanno muovendo verso la proposta di prodotti e componenti più o meno "verdi", la cui effettiva eco-efficienza va in ogni caso verificata oltre al fase di produzione, una volta inseriti in un contesto edilizio. Ma questo non è sufficiente, vacillano ancora indirizzi chiari verso finalità ambientali più elevate e tecniche di prevenzione dell'inquinamento ambientale, molti atteggiamenti sono solo dei palliativi, con



una inconscia prospettiva ancora distruttiva e a breve termine. Sono apprezzabili gli sforzi nello sviluppo dei metodi di valutazione della eco-efficienza degli edifici, ma ancora troppo frammentari e inefficaci.

L'analisi del ciclo di vita di un edificio intero presuppone la scomposizione in sottovalutazioni dei componenti che lo costituiscono. Questa operazione può apparire semplice, ma va riconosciuto come sul piano operativo diventi una pratica molto complessa, a causa dell'innumerevole quantità di informazioni, che i molti attori coinvolti nel progetto devono fornire contemporaneamente. Un possibile approccio consiste nell'assimilare i componenti edilizi come prodotti industriali, poiché realizzati in industrie manifatturiere e, solo in un secondo momento, consegnati al cantiere e assemblati come pezzi di un prodotto industriale (Bistagnino, 2003). Questa affermazione presuppone un modo di costruire con tecnologie di assemblaggio a secco, quindi di accostamento di prodotti industriali, ma potrebbe essere ricondotto anche a cantieri tradizionali. Un edificio, realizzato con tecnologie di tipo tradizionale o evoluto, è comunque un sistema complesso, le cui variabili non sono sempre prevedibili e controllabili come un prodotto industriale; è un sistema che deve contemplare inoltre aspetti estetici, funzionali e sociali. La valutazione ambientale di un edificio non deve ridursi alla somma degli impatti ambientali dei singoli componenti, poiché un edificio non è un'automobile che, una volta realizzata, può essere consegnata in ogni parte del mondo e funziona; l'edificio viene costruito in un preciso contesto e le scelte tecniche e costruttive ne determinano la sua durata (prolungata nel tempo rispetto ad altri oggetti d'uso di cui disponiamo), variabile anche in funzione dell'utenza e delle condizioni atmosferiche con cui convive.

Tra i molteplici metodi di analisi della qualità ambientale alle diverse scale del costruito, la metodologia di valutazione ambientale *Life Cycle Assessment* (LCA) è di riferimento per la quantificazione dettagliata e oggettiva degli impatti ambientali di un prodotto e dell'edificio lungo l'intero ciclo di vita, attraverso la quantificazione dei flussi di materia ed energia in ingresso e delle emissioni inquinanti in uscita nelle fasi di estrazione delle materie prime, trasporto, produzione, messa in opera, uso e gestione, dismissione e fine vita. La metodologia LCA prende in considerazione tutti i tipi di impatto in un quadro completo di indicatori e tutte le fasi del ciclo di vita, fino a chiudere il ciclo nel caso di riciclo a fine vita, con il bilancio dei vantaggi di evitare ulteriori consumi di materia e energia. La valutazione LCA, strutturata in fasi, oltre alla definizione degli obiettivi della sua applicazione e dell'oggetto da analizzare, prevede un inventario accurato di tutti i processi del ciclo di vita del prodotto analizzato, che si traduce in un diagramma dei flussi con la quantificazione di materia, acqua, energia in ingresso e di emissioni di sostanze in aria, acqua e suolo in uscita. Questi ultimi vengono tradotti, tramite una caratterizzazione, in impatti ambientali (effetto serra, assottigliamento dello strato di ozono, etc.) e successivamente valutati, con un punteggio che indica la gravità del danno, al fine di contestualizzare i danni ambientali a una specifica realtà territoriale.

Occorre quindi che, oltre alla comprensione del problema ambientale, alla metabolizzazione dei principi della progettazione volta al ciclo di vita, si strutturino delle strategie e metodi volti all'ottimizzazione del progetto sostenibile prima e del manufatto architettonico eco-efficiente poi.

# 1

## NUOVI APPROCCI PER IL PROGETTO DI ARCHITETTURA AMBIENTALMENTE RESPONSABILE

In questo primo capitolo si propone una lettura dei cambiamenti in atto nel processo progettuale e costruttivo attraverso la lente di ingrandimento della metodologia LCA. I passaggi chiave di tale metodologia di indagine – ovvero il ciclo della materia e dei prodotti, i ‘flussi’ in ingresso e in uscita, la ‘caratterizzazione’ rispetto agli indicatori e infine la ‘contestualizzazione’ - vengono utilizzati in modo figurato, per descrivere ciò che avviene nell’iter progettuale, passo passo, dalla definizione della prima idea fino alla costruzione di un’opera architettonica. Le fasi tipiche dell’analisi del ciclo di vita divengono quindi metafora per l’interpretazione e la lettura del progetto contemporaneo, con il duplice scopo di introdurre gradualmente la tematica specialistica della valutazione ambientale e di iniziare a comprendere come essa possa contribuire a ripensare i percorsi progettuali in un’ottica di sempre maggiore sostenibilità. Come con la metodologia LCA, anche nel progetto di architettura si possono infatti rintracciare sia una sequenzialità che una ciclicità: nella fase euristica<sup>1</sup>, la fase ideativa dell’operare progettuale, in cui vengono metabolizzati flussi di idee, concetti, esigenze, riferimenti progettuali, si intrecciano discipline e competenze differenti, contesto simbolico, aspetti sociali, cultura materiale e tecnica, aspetti ambientali, a cui si aggiungono flussi di informazioni, digitali e simulazioni, con la codifica di requisiti in entrata e la rappresentazione tecnica e la realizzazione progettuale in uscita. È una fase di definizione preliminare, di verifica secondo i paradigmi progettuali, da cui scaturisce il diagramma dei flussi di informazione del progetto, dei requisiti e delle prestazioni, da tradurre nella costruzione. La fase definitiva caratterizza il progetto con il contesto fisico, economico, legislativo e costruttivo, verifica nuovamente, secondo il processo ricorsivo che sottende il progetto, i dimensionamenti, la distribuzione formale, funzionale, spaziale e esplicita le scelte materiche e tecnologiche. Queste ultime, sempre per il ciclo retroattivo del processo, vengono affinate e puntualmente dettagliate e codificate, anche rivisitate e ripensate, nella fase esecutiva, con l’obiettivo di tradursi in un’architettura quale equilibrata integrazione di forma, funzione, tecnica e ambiente nel contesto, e per un ciclo temporale noto.

---

1 “...in questa fase, ancora embrionale e per tanti aspetti indefinita, si presentano tuttavia già in potenza tutti i diversi elementi che poi saranno progressivamente chiariti, fino ad arrivare all’opera compiuta. Ed è proprio la dimensione euristica che mette in evidenza gli aspetti più delicati dell’attività progettuale, quali il rapporto tra arte e tecnica, tra creatività e sistema normativo, l’articolazione delle relazioni tra forma, funzione e tecnica, le connessioni tra schizzo e progetto esecutivo....Pensare il progetto euristico significa pensare il progetto come luogo della ricerca e della sperimentazione, ove agiscono insieme dispositivi creativi e vincoli tecnici..” G. Nardi, (1991), pp. 131-140.

### 1.1. Flussi

Una lettura intrecciata fra la specificità della metodologica di valutazione del ciclo di vita e il processo progettuale è percorribile riflettendo su alcuni termini caratterizzanti la metodologia di valutazione degli impatti ambientali. L'individuazione della catena dei flussi (*Flow chart*) di materia e energia in entrata e in uscita, durante i processi che si generano nelle diverse fasi del ciclo di vita di materiali, componenti prima, e edificio poi, è una delle prime operazioni per impostare una valutazione degli impatti ambientali del ciclo di vita LCA. La quantificazione di materia e energia codifica le prime informazioni sui processi tipici di un sistema edificio e dei suoi elementi, quindi ripercorre la genesi di ogni parte dell'edificio. Ecco come questo termine ci fa metaforicamente pensare ai primi momenti progettuali, in cui i flussi di sensazioni, di conoscenza, di informazioni preliminari (impalpabili, forse non quantificabili) scorrono nella mente dell'architetto, dando inizio «al fare teorico che anticipa concettualmente e sperimentalmente la vera costruzione» (Tagliagambe, 1998), alla fase di analisi preventiva e di programmazione del progetto, per rievocare la suddivisione in fasi del progetto di Quaroni (Bertoldini, Campioli, 2009, p.69).

Cosa è un flusso? Il termine flusso deriva originariamente dall'idrodinamica, con riferimento alla portata, in pratica corrisponde al volume del fluido che transita attraverso la sezione nell'unità di tempo. In fisica il flusso di una data grandezza fisica è usato in presenza di fenomeni di trasporto (le grandezze coinvolte possono essere per esempio il calore o la massa), rappresenta la quantità della grandezza che attraversa una data superficie nell'unità di tempo. È quest'ultima la declinazione che riconduce il termine 'flusso' alla valutazione del ciclo di vita LCA. Tuttavia il flusso è un concetto matematico, astratto e non rappresenta necessariamente il passaggio di energia o di materia ('Flusso' in Wikipedia, 2013). E secondo quest'ultima accezione il termine si adatta ai flussi metabolici del processo progettuale, che è alimentato fin dalla prima fase euristica (la fase dell'invenzione e della creatività) da stimoli sensoriali, da sollecitazioni delle condizioni al contorno, da concetti, idee, dal patrimonio culturale, scientifico e tecnico proprio dell'uomo.

Il termine è comunque legato al tempo, all'unità di tempo: è quindi la variabile 'tempo' che definisce una quantità di un flusso. Nella LCA è la definizione del confine del sistema (ovvero quali fasi del ciclo di vita si considerano) che definisce il tempo e i flussi, a cui corrisponde un impatto ambientale: se considero la fase di produzione dei componenti dell'edificio, ad essa corrisponde un certo flusso di materia e energia e quindi un determinato impatto ambientale, se aggiungo la fase di trasporto al cantiere (quindi allargo anche l'arco temporale del ciclo di vita) lo scenario degli impatti cambia. Sul piano del progetto i primi flussi del fare teorico, conquistando le successive fasi del progetto, quindi l'evolversi nel tempo dello stesso, aumentano la propria portata, per dirla metaforicamente, aggiungono nuove informazioni, via via verso la definizione del progetto e la sua concretizzazione: flussi di conoscenza si intrecciano con flussi immissari da altre discipline, si instaurano collaborazioni transdisciplinari, spunti di ricerca, sperimentazione e innovazione; man mano si aggiungono anche i vettori del disegno, quindi strumenti digitali, hardware, software, elaborazioni complesse, parametriche.

Sembra tutto sempre più complesso nel progetto e nelle verifiche che il progetto deve soddisfare, tuttavia il percorso progettuale necessita solo di una nuova 'vettorializzazione dei flussi' e una coscienziosa sistematizzazione della complessità.

Per far ciò è indispensabile una disponibilità culturale ad accettare l'innovazione, o forse il rinnovamento, nel progetto e nelle costruzioni. Va diffusa un'educazione per soddisfare questo obiettivo: lo stimolo verso una coscienza ambientale, comprendendo l'"eco-sistema" edificio, per giungere a progettare edifici eco-efficienti. Ecco come nasce la volontà di comprendere possibili principi di eco-efficienza in architettura. Per esempio l'economia delle risorse riguarda la riduzione, il riutilizzo e il riciclaggio delle risorse naturali, che sono input per un edificio; il *Life Cycle Design* (LCD) fornisce una metodologia per l'analisi del processo di costruzione e del suo impatto sull'ambiente; a questi va riconsiderata la progettazione che si concentra sulle interazioni tra uomo e ambiente naturale. Questi principi forniscono un'ampia consapevolezza dell'impatto ambientale, a livello locale e globale, del consumo generato da un'architettura. Ciascuno di essi incorpora un insieme di strategie, la cui individuazione porta alla comprensione più approfondita di interazione architettura-ambiente costruito-ambiente naturale. Di conseguenza occorre apprendere le potenzialità dei metodi specifici applicabili dagli architetti per valutare, quindi poi ridurre, l'impatto ambientale degli edifici che progettano.

#### **1.1.1. Efficienza ambientale e temporalità: nuovi paradigmi per il progetto**

I temi ambientali nel progetto di architettura sono diventati sempre più il perno attorno al quale gravitano riflessioni teoriche da un lato e strategie operative dall'altro. In questa fase di radicale ripensamento del processo progettuale, dei processi di trasformazione dell'ambiente costruito e del ruolo dell'architetto, l'eco-efficienza tenta di diventare uno dei requisiti di progetto e contamina le scelte formali e tecniche alle diverse scale, da quella del quartiere, a quella della reciprocità fra edifici, alla disposizione dell'edificio rispetto al contorno, fino alla scala di dettaglio dei materiali e componenti. Sollecitazioni verso la salvaguardia dell'ambiente esistono, tuttavia le azioni non sono sempre coerenti e oneste rispetto agli obiettivi ambiziosi: non è più sufficiente sostituire fonti energetiche rinnovabili con quelle non rinnovabili o cambiare i serramenti con componenti più energeticamente efficienti, è necessario pensare al progetto integrato e sistemico, in cui nuove componenti progettuali agiscono sulle relazioni fra edificio e contesto ambientale, spaziale, distributivo e funzionale. Pensare al progetto dell'involucro è una visione parziale ed è solo il primo passo.

Pensare all'ambiente costruito significa pensare ad un approccio progettuale che ritorna a indagare, fin dalle prime fasi del progetto, il rapporto tra edificio e ambiente, le caratteristiche che un'architettura deve assumere in un certo luogo, con le sue proprie peculiarità. Al fine di raggiungere livelli prestazionali sempre più elevati, il progetto dell'edificio deve diventare "progetto della prestazioni del ciclo di vita dell'edificio" (*Design for Life Cycle Performance*). Su questo tema risulta interessante l'impostazione metodologica sviluppata da Florian Flager (2003) che considera possibili modificazioni/sostituzioni di parti dell'edificio nel tempo, individuando l'interazione tra processo progettuale e durata dell'edificio e dei componenti nel ciclo della vita utile. Il progetto costruito non va concepito come un risultato del progetto, ma come una fase del processo edilizio, che continua oltre la sua realizzazione per tutta la vita utile fino alla previsione degli scenari di dismissione. L'importanza della fase progettuale è, da questo punto di vista, assai elevata, poiché influenza le scelte che riguardano, oltre alla configurazione del manufatto, la qualità e la quantità dei materiali, le tecnologie e i processi di produzione e assemblaggio dei componenti, le modalità di gestione e manutenzione, il trattamento a fine vita dei materiali. Il criterio ambientale assume

pari dignità rispetto alle variabili usualmente considerate nel progetto (esigenze tecniche, funzionali, estetiche, economiche, sociali, ecc.) (Bistagnino, Casati, Jachia, 1995).

Con la diffusione delle tecniche costruttive industriali si è aggiunta inoltre una necessaria presa di coscienza della quarta dimensione - la dimensione *tempo* - nel processo progettuale e realizzativo dell'architettura moderna, ponendo come dato centrale la deperibilità e la sostituibilità del prodotto tecnico e delle sue parti e portando in primo piano una questione fino a quel momento estranea alla riflessione progettuale: il *tempo di impiego* di un oggetto o di uno spazio. Parallelamente, la sempre maggiore mobilità e variabilità del lavoro, dell'abitare e del tempo libero, l'ibridazione delle forme di convivenza, la multiculturalità acquistano sempre più importanza nella società contemporanea e reclamano la possibilità di adattare la conformazione dello spazio abitativo a funzioni e usi differenti nel tempo.

Introdurre il concetto di *temporalità* come tema di riflessione sulle trasformazioni dell'abitare e del costruire contemporaneo fa emergere non solo l'inevitabilità della dimensione temporale come previsione progettuale, ma soprattutto il cambiamento di paradigma avvenuto in questi ultimi anni: da un'idea di *tempo*, intesa come aspirazione dell'architettura costruita per durare a lungo, al concetto di *temporaneità* a durare per un certo periodo di tempo e a modificarsi nel tempo. Il tradizionale rapporto architettura-tempo, che presuppone la permanenza nei secoli degli artefatti, viene superato in quanto i tempi di funzionamento dell'edificio e dei suoi spazi si vanno riducendo o per degrado del materiale, o per obsolescenza funzionale, di linguaggio e di immagine. Questo accorciamento del tempo dei prodotti, il facile degrado, quindi la sostituzione con nuovi prodotti o manufatti implica sottrazione sempre più rapida di nuove risorse e produzione di grandi quantità di rifiuti, contribuendo ad accelerare i noti problemi ambientali che vanno generando una intersezione pericolosa tra i tempi dell'uomo e i tempi della natura. A tal proposito Enzo Tiezzi (1987) è stato precursore nel considerare che il tema della storia umana, delle nostre case, la storia del nostro costruire abbiano una certa temporalità, diversa dal tempo della natura, tempi storici da una parte e tempi biologici dall'altra.

Tuttavia la rivoluzione in atto sta generando un rovesciamento dei parametri fondamentali per la vita dell'uomo e per il costruire: lo spazio e il tempo, *"...il primo finito e protetto da confini e barriere e il secondo tendente ad "infinito", sufficientemente lungo da permettere ai processi lineari, decisionali e produttivi, di seguire il loro corso completo, senza rendere i risultati inutili perché tardivi... Le nuove tecnologie, annullando le distanze ed accelerando in modo impressionante i tempi... La riduzione del tempo "verso zero" mette in causa l'approccio lineare e fa emergere l'inefficienza dei processi decisionali e produttivi, mentre l'allargamento dello spazio "verso infinito" quelli della massa critica, del ruolo e dell'organizzazione non più adeguati."* (Andreta, 2011, p. 19).

Se precedentemente una buona architettura veniva definita secondo un parametro di giudizio assoluto sulla base della capacità di resistere integra nel tempo, il paradigma della temporalità attribuisce al concetto di durata un valore discrezionale, che misura e programma la vita di un manufatto edilizio in conseguenza al suo grado di obsolescenza nel tempo. Ciò appare come una sorta di inversione dell'antico canone vitruviano della *firmitas* (Perriccioli, 2008).

Un ruolo fondamentale nella definizione delle relazioni ecologiche tra uomo e ambiente viene assunto quindi dalla durata dell'architettura: l'uomo progetta continuamente la trasformazione del suo ambiente tramite il costruito e l'ambiente trasforma, negli anni, l'opera progettata dall'uomo. Alla luce di questo cambiamento di paradigma, il progetto di architet-

tura non ha più la finalità di “sfidare il tempo”, ma di programmare e monitorare il tempo di vita di un manufatto. Di conseguenza la durata dell’architettura nel tempo diventa una variabile di progetto a tutti gli effetti. Nascono filoni progettuali identificati in *Time Based Architecture* o *4 Dimensional Design* (4D Design), ovvero un’attitudine progettuale che concepisce manufatti da una visione a lungo termine, integrando quindi la quarta dimensione, il tempo, fin dalla fase iniziale di progetto. Il tempo diventa un catalizzatore di progettazione, in cui l’ambiente costruito viene trattato come un sistema vivente (Paduart et al., 2006; Debacker et al., 2007).

Con l’introduzione dei nuovi paradigmi di progetto, quali temporalità ed efficienza ambientale, percepiti come energia, consumi e emissioni nel ciclo di vita edilizio, il ruolo e i compiti del progettista necessitano di una rinnovata acquisizione del senso di responsabilità, essenza della progettualità, al fine di orientare gli aspetti tecnico-realizzativi verso una risposta corretta e concreta agli attuali problemi di contenimento dell’impatto ambientale. Già nel 1970 Tomás Maldonado si appellava alla speranza che la razionalità progettuale fosse l’unica vera soluzione per uno sviluppo sostenibile, per riportare l’equilibrio uomo-natura, rigenerare le risorse e controllare i consumi. Dentro lo stesso mondo tecnico che ci ha condotto nell’attuale situazione patologica di emergenza è rintracciabile la cura, grazie a un orientamento delle scelte verso nuovi atteggiamenti culturali e possibilità operative: nasce la cultura tecnologica dell’ambiente (Bertoldini, Campioli, 2009), ispirata a una vocazione etica del progetto che retrocede dall’antropocentrismo e dall’etica della contemporaneità, per reindirizzarsi a un’etica planetaria e per la posterità (Perriccioli, 2004), per perseguire uno sviluppo responsabile (tecnologie che usano risorse rinnovabili, che imitano e si integrano con i cicli naturali della biosfera) finalizzato a una crescita di qualità e non di quantità. *“L’idea di tecnologia, colpevolmente distorta da un senso di onnipotenza e disinganno [...] permane, viceversa, quale importante strumento per operare quella rivoluzione responsabile dei metodi e degli obiettivi del progetto volti a favorire la lettura orientata del contesto di intervento e promuovere usi compatibili del territorio e delle sue risorse”* (Dierna, 2001). Il fatto che la responsabilità diventi la guida di scelte progettuali con finalità sociali e ecologiche, rispettose degli abitanti e dell’ambiente, e non intrise di strategie produttivistiche e sfruttatrici, sembra un affare semplice a dirsi, tuttavia il solo recepimento è di natura molto lenta e una messa in pratica rigorosa è ancor più difficile. Una nuova etica progettuale, guida di un fare responsabile, non significa la totale rinuncia all’innovazione tecnologica. È importante, però, che venga colto il nuovo concetto di ambiente, non più un semplice luogo fisico per innescare i processi innovativi, ma piuttosto il perno attorno cui ruota l’innovazione stessa. Ambiente = relazione fra manufatto architettonico + fattori caratterizzanti il contesto fisico e sociale. Metabolizzare questi concetti e renderli un’etica personale e una prassi progettuale risulta un processo lentissimo, in cui spesso il progettista si dimostra reticente. Considerazioni simili erano già emerse nel 1954, quando Richard Neutra, un vero precursore o all’epoca visionario, denunciava fondamentale l’assunzione da parte di una progettualità cosciente della capacità di intervenire sul carattere ambientale degli spazi costruiti al fine di generare architetture di qualità, non estranee alla vita umana e all’ambiente (Bertoldini, Campioli, 2009, p.70).

Presumibilmente l’etica di un progetto responsabile può operare il rinascimento della vera identità del progettista, che si non deve configurare come utilizzatore di soluzioni innovative e di temi/prodotti spinti dal mercato oppure come comunicatore di se stesso e delle proprie opere, ma deve essere capace di far emergere il proprio peculiare operato dalla relazione

intrecciata con gli utenti, la società e il contesto del progetto, in un rapporto di partecipazione e di non-subordinazione, ascoltando e interpretando le reali esigenze, molto spesso trascurate. In questo rinnovato rapporto la visione progettuale deve volgere a favore di un'apertura, la più ampia possibile, nei confronti dei numerosi orizzonti disciplinari che possono e devono contribuire a precisare i contenuti del progetto di architettura ambientalmente responsabile.

### **1.1.2. Nuovi flussi di conoscenza per il ciclo complesso del progetto**

Nel momento critico attuale di rivoluzione a tutti gli effetti che investe la sfera sociale, economica, politica e culturale, sono in atto cambiamenti che mettono in crisi i fondamenti filo-fordisti basati sulla linearità. Si è innestato un processo di trasformazione, sul piano teorico e tecnico-produttivo, verso un approccio contrario o inverso alla linearità, quello della complessità, composta da un sistema di più funzioni, la cui dinamica non è mai uguale alla matematica lineare, è una matematica non lineare. Gestire il sistema è una cosa completamente diversa dal gestire la linearità. Ciò implica nuove linee guida, nuovi comportamenti, nuovi punti di riferimento, che si sostituiscono ai precedenti. E tutto questo ha le sue dirette ricadute nel mondo della progettazione e della costruzione, in cui, è già stato rimarcato, l'approccio al tempo e allo spazio si è sradicato e rovesciato e nuovi approcci sistemici e interdisciplinari stanno nascendo. Il progetto di un edificio non termina con la costruzione e la consegna del manufatto architettonico, il progetto deve saper prevedere la vita utile dell'edificio, per poter poi rispondere ai cambiamenti delle esigenze dell'utenza, della funzione. Quindi in fase progettuale sarebbe auspicabile prevedere, per esempio, la possibilità per un edificio di adattarsi a ospitare, nell'arco della sua vita utile, funzioni diverse rispetto a quella iniziale, considerando la flessibilità spaziale oppure il riuso dell'edificio e delle sue parti, veicolate sia dalla progettazione degli spazi, ma soprattutto dalle tecnologie scelte originariamente.

Il progetto per sua natura non è mai stato lineare, tuttavia nella prassi tradizionale è parte di un sistema produttivo delle costruzioni di tipo lineare, in cui al progetto, prima fase, seguiva la costruzione, e poi la fase operativa e di manutenzione, e la demolizione come fine di vita e di processo. Il progetto di architettura, di per sé attività complessa, e, per sua natura, luogo di contaminazione e di confine, non di frontiera, fra teoria e prassi, fra mondo naturale e mondo artificiale, fra realtà vigente e nuove possibilità, si sta configurando sempre più come luogo privilegiato di confronto esperienziale e di connessioni disciplinari, con apporti diversi e a diversi livelli: materiale, fisico, tecnico, esecutivo, funzionale, economico e culturale. Le istanze ambientali, in questo scenario, hanno reso ancora più complesso il progetto, sottoponendolo a una sfida sempre più grande. A un quadro articolato e ampliato del progetto corrisponde necessariamente un approccio sistemico e integrato, è inevitabilmente richiesta molta serietà e controllo nella prassi, grande responsabilità sociale e necessità di grande rispetto per il contesto e la cultura materiale, grande fatica e impegno culturale da parte del progettista. Egli deve concertare le istanze del progetto, i diversi attori, le diverse competenze, tenere insieme tutte le varie opzioni e, con grande maestria, renderle in un organismo compiuto, equilibrato ed efficiente. Solo una connessione razionale tra le diverse discipline può forse tenere a freno la disequilibrata qualità del progettare e costruire che ha caratterizzato gran parte del panorama edilizio a noi noto. Le competenze, quindi, si diversificano e si iper-specializzano da un lato, e, dall'altro, utilizzano "nuovi elementi"

nel progetto che agiscono sulle caratteristiche funzionali, distributive e spaziali dell'edificio (l'orientamento, la ventilazione naturale, l'irraggiamento, le relazioni con il suolo, la distribuzione spaziale, ...).

Al fine di ottenere originalità e qualità nel progetto di architettura, è necessario anche un grande lavoro di sperimentazione, di riscontri, di intuizioni messe alla prova, tramite simulazioni o modelli reali, di contaminazioni, di alternative verificate. Come sostiene Ezio Andreta (2011) l'architetto del futuro assomiglierà sempre più a un tecnologo creativo in grado di concepire i materiali necessari ad assicurare alle case le funzioni e le caratteristiche rispondenti alle esigenze di qualità e bellezza, ispirate e volute da lui stesso e dai bisogni e desideri degli utenti: un architetto sempre più "neorinascimentale" in grado di dominare armonicamente tutti gli elementi. La distanza - che oggi divide l'architetto da chi concepisce i materiali - si ridurrà progressivamente, grazie alla formazione interdisciplinare che le università dovranno apprestarsi a dare e alle nuove conoscenze tecnologiche acquisite.

Parallelamente a molti altri processi il modello convenzionale lineare di processo progettuale e costruttivo di un edificio (progetto, costruzione, fase d'uso e manutenzione, demolizione) non ha quindi più efficacia, poiché troppo restrittivo e limitativo, in quanto non affronta né le ricadute sull'ambiente che le costruzioni e la produzione di materiali da costruzione provocano, né la gestione dei rifiuti (riutilizzo e riciclaggio degli scarti dell'architettura) durante il cantiere, la vita utile e alla fine della vita, che presentano la potenzialità di diventare nuove risorse. L'approccio al progetto non può sottrarsi a una visione sistemica e ciclica della vita di un edificio, ai fini di una sostenibilità dell'ambiente costruito, nel lungo termine. Il progetto è parte di questo ciclo e è il momento fondante in cui vanno previsti i tempi d'uso e pianificate le tecniche costruttive, senza tralasciare la chiusura del ciclo, prefigurando lo scenario di fine vita e di recupero del manufatto e delle sue parti.

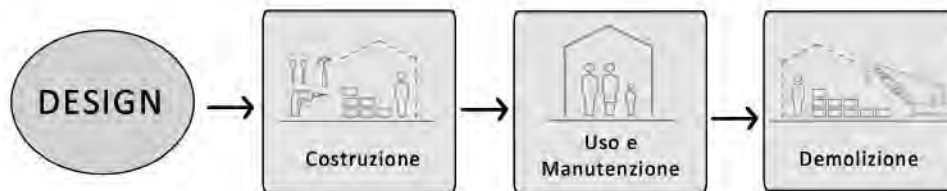


Fig. 1-1: Diagramma del convenzionale ciclo di vita degli edifici (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera).

Questo approccio è noto come *Life Cycle Design* (LCD), o progettazione del ciclo di vita "dalla culla alla tomba", e addirittura "dalla culla alla culla", e contempla i danni ambientali provocati dal ciclo di vita dai materiali e componenti per l'architettura, dal cantiere e dalla costruzione stessa, con la finalità di chiudere i cicli dei flussi di materia e energia, per evitare di sottrarre alla natura ulteriori risorse vergini.

La progettazione eco-orientata al ciclo di vita dell'edificio (LCD) si basa sull'idea che un materiale si trasformi da una forma di vita utile ad un'altra, senza perdere la sua utilità residua alla fine del primo ciclo di vita utile, riducendo al minimo gli sprechi e i consumi. Le fasi di pre-costruzione (progettazione), di pre-uso (manifattura dei materiali e componenti, costruzione dell'edificio), di uso e manutenzione e di post-costruzione (fine vita) sono consequen-



ziali, ma tra loro interrelate e non esistono confini non evidenti. Nella fase progettuale ogni fase va dettagliata e/o prevista nel progetto dell'edificio al fine di comprendere le ricadute ambientali del manufatto architettonico e l'impatto energetico-ambientale dei materiali e dei componenti coinvolti nel "sistema edificio", per calibrare in modo selettivo, consapevole e responsabile, quindi, le scelte formali, materiche, tecnologiche e impiantistiche alla sua funzione e alla sua durata di vita e minimizzare l'impatto ambientale sull'ecosistema. A ciò si aggiunge il progetto dei piani di manutenzione oltre alla previsione e programmazione della vita utile e di servizio di un edificio, è importante disporre di una conoscenza approfondita di anomalie e guasti, che nel tempo possono insorgere nelle unità tecnologiche dell'edificio, e delle variazioni dinamiche di prestazioni e condizioni di benessere, tramite la previsione del comportamento e dell'aspettativa di servizio dei componenti edilizi.

Riflettendo sul processo progettuale, dal momento che anche in fase euristica del progetto non c'è sequenzialità e linearità, ma è un continuo processo di revisione, di rielaborazione, di definizione dell'idea, delle scelte formali, materiche, è percepibile un'interrelazione possibile con il processo di valutazione degli impatti ambientali di un manufatto, applicato durante la fase di progettazione: l'analisi del ciclo di vita, auspicabile a ridosso delle scelte varate fin dalla fase euristica del progetto, è di verifica e deve servire fin dai primi momenti a comprendere lo stato dell'impatto ambientale dell'architettura in fase di progetto, per poi ritornare sulle scelte euristiche e calibrarle in funzione anche delle prestazioni ambientali attese. È un processo di analisi facile a dirsi, ma effettivamente non così semplice da affrontare da parte del progettista, serve la competenza specifica a supporto del progetto.

Differenti strategie di progetto si stanno identificando, nel cercare di affrontare la molteplicità di questioni e restituire una costruzione che sia efficiente dal punto di vista energetico e ambientale. Strategie progettuali per superare alcuni limiti, per esempio, hanno generato nuovi concetti di adattabilità e flessibilità dello spazio progettato così come il *Design for deconstruction and disassembling* (Antonini, Giurdanella, Zanelli, 2010). Nella media – piccola dimensione i progettisti non sempre riescono con il progetto a rispondere in modo olistico a tutti gli aspetti richiesti dai protocolli della sostenibilità ambientale e il tentativo è spesso proprio di perseguire alcune strategie e di proporre un'architettura che, anche se parzialmente, riesca a contribuire alla riduzione degli impatti ambientali. Inevitabilmente la complessità aumenta proporzionalmente alle variabili in gioco, ma aumentano anche le opportunità nella gestione del progetto, una gestione del rapporto edificio-tempo-ambiente. La gestione della complessità della progettazione degli edifici può essere supportata dal progresso evolutivo nell'uso di strumenti avanzati, tramite *Building Information Modeling* (BIM). In Italia tale processo di codifica del progetto è in via di sviluppo, altrove è una prassi diffusa, che consente di modellare l'edificio in progetto, tramite software specifici, a partire da quelli di disegno CAD, e di poter facilmente controllare tutto il processo di progettazione, facilitando il coordinamento e potenzialmente riducendo i problemi di interfaccia (con i sistemi di informazione strutturale, fluidodinamica, termodinamica,...) e di sequenzialità delle fasi di progetto. Si tratta di sistemi di modellazione parametrica, che consentono lo studio della geometria testando in tempo reale la fattibilità – dal punto di vista tecnico, economico e ambientale - delle opzioni proposte. Offrono molti vantaggi e gradi di libertà, con un aumento di complessità nella codifica del progetto, che implica una formazione iniziale apposita, e di tempo necessario per l'elaborazione dei dati come rovescio della medaglia. Di particolare interesse è la possibilità di generare forme tramite *scripts* e algoritmi di fisica tecnica e tecnica delle costruzioni, che ottimizzano le prestazioni energetiche e strutturali del

modello. Per esempio un approccio di tipo “*evolutivo*”, come il metodo ESO (*Evolutionary Structural Optimization*), basato sul concetto di eliminare lentamente materiali inefficienti da una struttura verso la struttura residua ottimale, consente di determinare la forma della struttura che meglio si adatta alle date condizioni di carico. Questo fa pensare che in futuro sia possibile, tramite l’interoperabilità dei diversi sistemi di calcolo e valutazione, di computare gli impatti ambientali collegati alla progettazione dell’edificio e verificare in tempo reale, parallelamente alle modifiche formali e alle ottimizzazioni strutturali e quantità di materia, le conseguenti riduzioni di energia incorporata, di emissioni di gas nocivi, etc. È già possibile altrimenti esplorare la progettazione della forma di un edificio partendo dal contesto climatico, dal percorso solare, interfacciando con una certa facilità i dati di analisi generati da strumenti di progettazione in relazione al contesto climatico e di modellazione 3D con funzioni di analisi solari, termiche, per l’illuminazione e l’acustica, con le formule di design di software per la modellazione tridimensionale della forma (Teuffel, 2009). Se attualmente a livello internazionale i BIMs hanno raggiunto un buon livello di maturità, il passo successivo, per cui molti centri di ricerca e molte aziende sviluppatrici di software stanno lavorando, è l’interoperabilità dei sistemi, dei processi e dei dati “*world wide*”, con il supporto di una normativa ISO di riferimento: l’*Interoperability BIM*, una volta matura, potrà contemplare non solo il progetto dell’edificio, ma anche il *Life cycle management*, gestire il ciclo di vita, ma soprattutto poterlo prevedere o simulare ancora in fase di progetto. Questo processo appare proprio come una transizione dalla multidisciplinarietà alla interdisciplinarietà. Ecco il perché di grandi società di progettazione integrata (architettura – ingegneria – scienza dei materiali – consulenza ambientale), che si interfacciano nel progetto fin dal *concept design* gestendo la realizzazione e la strutturazione, la negoziazione, la valutazione dei rischi ambientali, economici, tecnici e di programma associati al progetto dell’edificio. La loro operatività contempla anche le modalità di miglioramento della durata dei componenti dell’edificio, di risparmio energetico tramite la progettazione della facciata con prestazioni ottimali e con nuovi materiali. E’ intuibile la potenzialità che i progettisti hanno di fronte a tale progresso tecnologico. L’evoluzione “progettazione-produzione-costruzione” sta indirizzando allo sviluppo di soluzioni tecniche innovative, all’innovazione degli strumenti di progettazione, con conseguente evoluzione dei profili professionali.

Di conseguenza, sul panorama architettonico compaiono opere sempre più complesse, non solo nella forma, ma in molti casi più nella regolazione delle interfacce componente – requisito ambientale/energetico richiesto - sistema impiantistico. Alcuni filoni progettuali hanno come sfida la realizzazione di *Responsive Architecture*, ovvero architetture che non si limitano al controllo, ma al dialogo tra gli elementi e i sistemi dell’edificio (fra spazio e luce, tra forma, struttura e materiali), con quelli del contesto e dei programmi di gestione del comfort interno (clima esterno, movimentazione dei flussi, fabbisogno energetico). Lo scenario futuro prospetta edifici non più come costruzioni statiche, costruite in un sol modo e fatte per durare, ma organismi interattivi alle sollecitazioni dell’ambiente esterno in funzione delle richieste dell’utenza interna. In questa prospettiva l’involucro, esattamente come un’epidermide, gioca il ruolo fondamentale di scambio con recettori attivi e sensibili agli impulsi esterni, con un grado di adattabilità sensibile. Secondo la prospettiva di Luigi Prestinenza Puglisi (2002, pag. 107) l’architettura non è più fredda e immutabile, ma può presentarsi vibrante e mutevole, i muri massicci, stabili, fissi e sordi, perdono peso e acquistano in leggerezza e in intelligenza, come un sistema nervoso, dialogando con la natura e il contesto circostanti, captando odori, luci, suoni.

Tutto ciò appare davvero futuristico, considerando lo stato attuale del settore edilizio e il tempo lungo di risposta ai cambiamenti, tuttavia è ragionevole poter traguardare scenari a lungo termine: ogni progettista oggi deve considerare che ogni sua architettura, realizzata oggi, si interfacerà con il contesto per i prossimi quaranta/sessanta anni, per cui la riduzione degli impatti ambientali va cominciata ora per poter vedere i suoi frutti per quegli anni; per cui le simulazioni per i consumi dovuti alla climatizzazione dovranno tener conto del clima di domani e non delle condizioni attuali, poiché non si possono chiudere gli occhi di fronte ai sempre più rapidi cambiamenti climatici, in trasformazione. L'architettura *time based* e la LCD devono essere ormai presupposti imprescindibili nel progetto contemporaneo.

### **1.1.3. I flussi di materia ed energia per il ciclo di vita dell'edificio**

Progettare un piccolo oggetto o una casa, utilizzare un materiale lapideo piuttosto che plastico costituiscono azioni che, con uno sguardo verso il futuro, si dovrebbero tradurre in scelte responsabili, mirate all'utilizzo di materiali, tecniche e sistemi in grado di contribuire positivamente rispetto ai requisiti di sostenibilità e di salvaguardia dell'ambiente, senza creare ulteriori carichi inquinanti. Le nuove strategie che si stanno individuando in tal senso dovranno assumere come dato di partenza una riflessione più ampia e matura sui temi dello sfruttamento delle risorse naturali del pianeta. Un ruolo fondamentale è determinato dalla conoscenza dei materiali, dei relativi processi realizzativi, e delle tecniche costruttive, resa possibile attraverso l'informazione tecnica, cui è demandato il compito di veicolare tutti i dati necessari alla corretta identificazione dei prodotti comparati e analizzati.

Al fine di comprendere facilmente come possa essere progettato per la salvaguardia dell'ambiente, un edificio deve essere pensato come un ecosistema attraverso i quali le risorse naturali e i prodotti semilavorati, i componenti e i sistemi coesistano in un ciclo continuo di flussi (di materia e energia), al cui interno una serie di sottosistemi regolano il flusso di uno o più tipi di risorse. È importante capire che la presenza di un edificio nell'ambiente incide in larga misura sia a monte (*upstream*) della costruzione, prima della fase operativa, che a valle (*downstream*), a fine della vita utile. Nell'analizzare un edificio, e i suoi impatti potenziali sull'ambiente, è necessario considerare le due correnti di flusso di risorse: quelle a monte, come input per l'eco-sistema edificio, e quelle a valle, come quelle che defluiscono come output dall'ecosistema da esso. Il flusso di risorse inizia a monte (*input*) con tutto il comparto dell'industria delle costruzioni e manifatturiera, con la produzione di materiali da costruzione, e continua per tutta la durata di vita della costruzione, in cui l'obiettivo è creare un ambiente sostenibile e sano per il benessere umano e le attività connesse. A fine della vita utile, l'edificio deve essere contemplato, fin dal progetto e dalle scelte delle tecnologie costruttive, come una "miniera" di componenti (flusso di *output*), da modificare o trasformare, per altri nuovi edifici o impieghi. Anche per l'eco-sistema edificio vale la legge di conservazione della massa (Antoine Lavoisier, 1772), per cui, in un lungo periodo, le risorse che sono entrate alla fine ne fuoriusciranno, presumibilmente trasformate. Questa trasformazione dall'ingresso all'uscita è causata da molti processi meccanici o interventi umani durante la fase d'uso degli edifici.

È di conseguenza indispensabile conoscere e quantificare i flussi, al fine di perseguire un'economia delle risorse, materiche e energetiche, tramite la riduzione, il riutilizzo e il riciclaggio dei flussi di input per un edificio. Ponendo attenzione all'economia delle risorse, il progettista deve saper scegliere i materiali e componenti, conoscendo il contenuto ener-

getico (non rinnovabile o rinnovabile) e gli impatti ambientali oltre a valutare il contesto applicativo. Deve contemplare il contenimento di risorse non rinnovabili nella costruzione e gestione di edifici, in cui si genera un flusso continuo di risorse, naturali e artificiali, dentro e fuori dall'edificio stesso. Il concetto di Triplo Zero, per esempio, promuove un "concentrato" di sostenibilità da considerare nel progetto di un edificio o di un prodotto: produzione e materiali a Km 0, emissioni 0 di CO<sub>2</sub>, riduzione a 0 dei rifiuti prodotti e chiusura dei cicli.

Le tre strategie contemplate dal principio dell'economia delle risorse sono il risparmio energetico, quello idrico, e la conservazione del materiale; ognuna si concentra su una particolare risorsa necessaria per la costruzione e la gestione dell'edificio.

#### *Conservazione dell'energia*

Dopo la costruzione, un edificio richiede un flusso costante di energia da utilizzare durante il suo funzionamento, per la climatizzazione e l'impianto elettrico. L'impatto ambientale del consumo di energia per gli edifici si presenta soprattutto lontano dal cantiere, a seguito di estrazione o la raccolta di fonti di energia e la produzione di energia. L'energia consumata da un edificio in fase di riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e funzionamento delle apparecchiature non possono essere recuperati. Il tipo, la posizione e la grandezza dell'impatto ambientale dei consumi energetici negli edifici differiscono a seconda del tipo di energia erogata. Le centrali elettriche a carbone emettono gas inquinanti come SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> nell'atmosfera. Le centrali nucleari producono scorie radioattive, difficilmente stoccabili, per cui non esiste attualmente alcuna soluzione per una gestione permanente. Le centrali idroelettriche richiedono ciascuno una diga e un serbatoio per contenere una grande massa d'acqua, che, se non perfettamente progettato e calibrato per il contesto biologico, provoca effetti sugli ecosistemi naturali e le biodiversità, come la cessazione degli ecosistemi fluviali e la perdita di habitat per animali e piante.

Non è chiaro e facile individuare la fonte energetica che determini il minimo impatto ambientale, tuttavia è chiara l'urgenza di intervenire sui consumi di gestione (riscaldamento, condizionamento, illuminazione, ventilazione, consumi degli elettrodomestici, ecc.), con un'attenzione parallela rispetto all'efficienza dei processi di produzione di materiali e componenti e dei rispettivi impatti sull'ambiente. Le emissioni di anidride carbonica, responsabili dei cambiamenti climatici, sono direttamente correlati e proporzionali ai consumi primari di energia, con pesi diversi a seconda del vettore energetico primario (metano, GPL, benzina, gasolio, olio combustibile, carbone). Le forme di inquinamento legate ai consumi di energia locali, dovute all'emissione di sostanze tossiche come gli incombusti come il monossido di carbonio (CO), come gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), come le polveri e specificamente il particolato (PM<sub>10</sub>) sono pericolose per la salute umana, localmente e a tempi brevi, hanno un differente effetto sul clima globale (in particolare sull'assottigliamento dello strato di ossigeno e sull'ossidazione fotochimica).

#### *Conservazione dell'acqua*

Un edificio richiede una grande quantità di acqua per gli usi finali degli utenti (bere, cucinare, lavare e pulire, lavaggio servizi igienici, impianti di irrigazione, ecc.), richiedendo appositi e preventivi trattamenti di depurazione e la consegna agli usi finali, operazioni che implicano ulteriore consumo di energia. In un'ottica di *Life Cycle Design*, andrebbe previsto il trattamento anche a valle dell'acqua che esce dalla costruzione, con la depurazione delle acque scure degli impianti fognari.

### Conservazione dei materiali

Una gamma di materiali da costruzione è presente sul cantiere. L'afflusso di materiali da costruzione si verifica principalmente durante la fase di costruzione. I rifiuti generati dal processo di costruzione e di installazione è significativo. Dopo la costruzione, un basso livello di flusso di materiali continua a essere usato per le attività di manutenzione, di sostituzione e rinnovamento. I beni di consumo fluiscono all'interno dell'edificio per sostenere le attività umane. Tutti questi materiali si ritrovano presumibilmente in uscita, per essere riciclati o smaltiti in una discarica.



Fig. 1-2: Schema concettuale per una progettazione del ciclo di vita (LCD) e per la prevenzione dell'inquinamento ambientale in architettura (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera).



Fig. 1-3: I flussi di sostanze in input e output nel "ecosistema" dell'edificio (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera).

Strategie di progetto del ciclo di vita dell'edificio, per esempio la *Cradle to Cradle* (dalla culla alla culla), con una visione ciclica dei flussi e di chiusura dei cicli di materia e energia, vengono già messe in atto, forse in modo evocativo e provocatorio, da alcuni professionisti avanguardisti, che sposano una nuova concezione dei flussi di materiali. Invece di vedere i materiali come un problema di gestione dei rifiuti, in cui gli interventi sporadici rallentano il loro processo dalla culla alla tomba, essi sono visti come nutrienti che possono essere contenuti in due metabolismi, quello biologico e quello tecnico. Nel metabolismo biologico, le sostanze nutritive sostengono la vita sulla Terra con un flusso perpetuo (acqua, ossigeno, azoto, biossido di carbonio), attraverso cicli di rigenerazione di crescita, decadenza e rinascita, in modo da riconquistare nutrienti per creare nuova vita. In altre parole, i rifiuti sono concepiti equivalenti al cibo e a loro volta diventano una risorsa: lo spreco di un sistema diventa cibo per un altro. Nell'attività umana, un metabolismo tecnico può essere progettato per rispecchiare i cicli naturali dei nutrienti: un sistema a circuito chiuso, in cui le risorse minerali e sintetiche ad alto contenuto tecnologico circolano in un ciclo infinito di produzione, recupero e rigenerazione. I materiali possono essere progettati come nutrienti biologici in grado di degradare in modo sicuro e ripristinare il suolo dopo l'uso e come nutrienti tecnici in grado di fornire alta qualità, alta tecnologia (McDonough, Braungart, 2002).

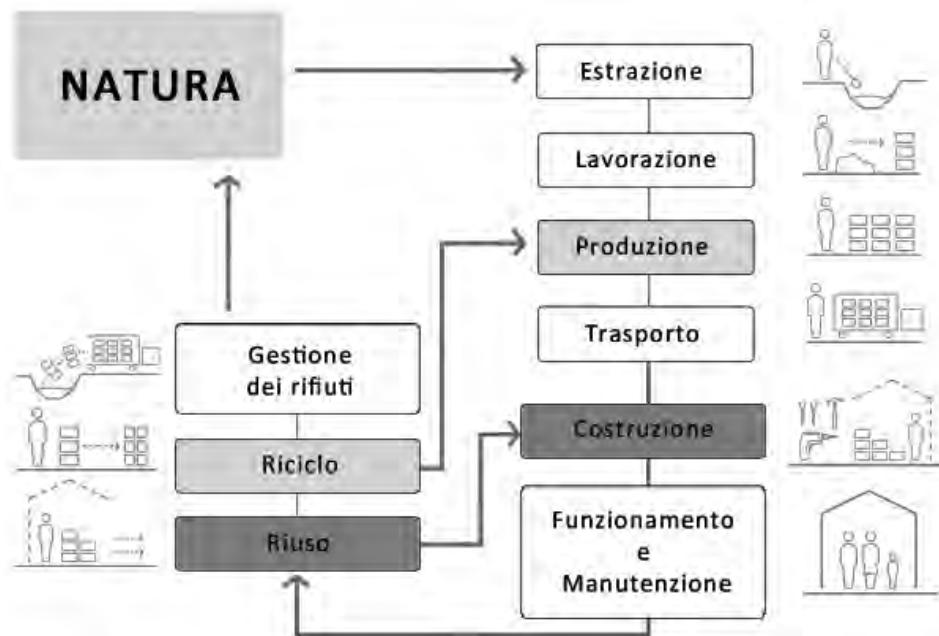


Fig. 1.4: Un ciclo di vita sostenibile degli edifici (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera).

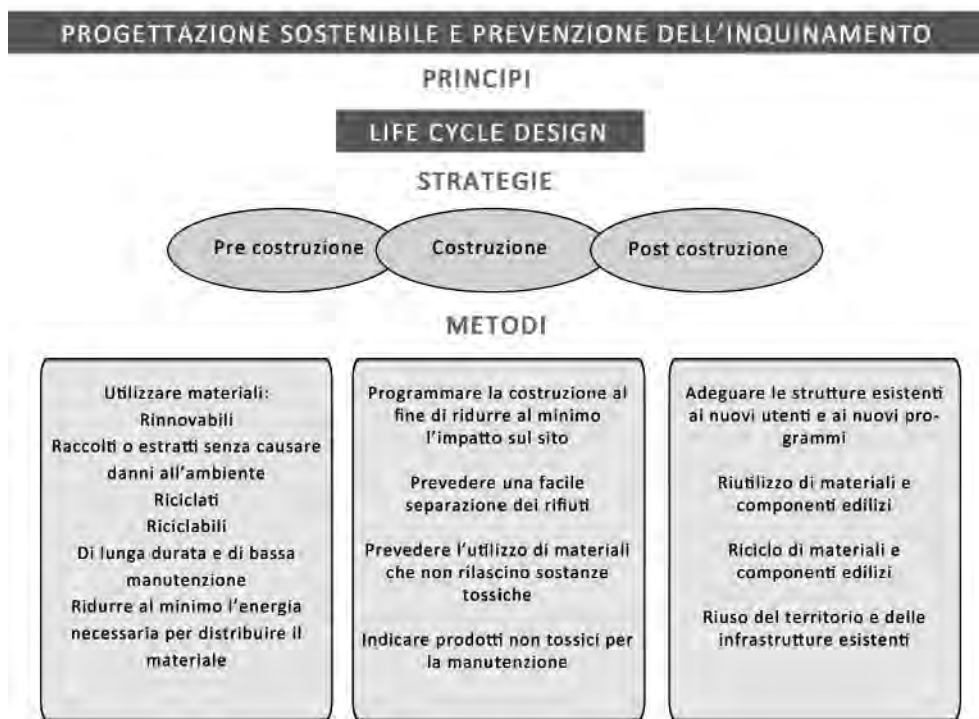


Fig. 1-5: Metodo di applicazione della Life Cycle Design (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera).

Per riuscire a razionalizzare in fase progettuale i flussi nelle diverse fasi del processo edilizio, la *Life Cycle Design* suggerisce una metodologia di analisi del processo di costruzione e del suo impatto ambientale, fase per fase. La stessa sequenza è necessaria per operare l'inventario delle sostanze coinvolte (input e output) nei processi produttivi coinvolti in ogni fase del ciclo di vita, livello di indagine iniziale della metodologia *Life Cycle Assessment*, parte fondamentale del LCD grazie alla quale si possono estrapolare i dati e le informazioni su cui basare i metodi di valutazione degli impatti ambientali, da utilizzare in fase di progettazione dell'architettura.

La *fase di pre-costruzione* contempla la scelta del sito, la fase di progettazione, i processi di produzione di materiali, componenti per il sistema edificio fino alla consegna in cantiere, escludendo la messa in opera. Secondo la strategia della progettazione sostenibile si esaminano le conseguenze ambientali generate dal progetto dell'architettura, l'orientamento, l'impatto sul paesaggio e quello dei materiali utilizzati. Anche l'approvvigionamento dei materiali da costruzione genera impatto sull'ambiente: la raccolta degli alberi potrebbe generare deforestazione; l'estrazione delle risorse minerarie (ferro per l'acciaio, bauxite per l'alluminio, sabbia, ghiaia, e calcare per il cemento) provocano, oltre a un grande impatto visivo, l'erosione di intere montagne o voragini e perturbano la stabilità dei suoli, oltre a generare inquinamento acustico e atmosferico (es. polveri sottili); anche il trasporto di questi materiali può essere un'attività altamente inquinante, in funzione del peso e della distanza dal sito. La fase manifatturiera dei prodotti da costruzione richiede grandi quantitativi di

energia, tale da essere in molte situazioni altamente energivora e inquinante rispetto all'energia richiesta dagli edifici per la loro climatizzazione in fase d'uso: per esempio, le filiere di produzione dell'acciaio e dell'alluminio necessitano di un elevato livello di energia, per la fusione ad alte temperature.

La *fase di costruzione e la fase operativa* si riferiscono alla fase del ciclo di vita, in cui l'edificio è stato fisicamente realizzato e è in uso e gestione. Nella strategia della progettazione eco-efficiente, in fase progettuale vanno indagate le modalità operative dei processi di costruzione e di gestione al fine di individuare soluzioni tecniche, impiantistiche e operative atte a ridurre il consumo di risorse. Nell'indagine di questa fase si considerano anche i possibili effetti a lungo termine dell'ambiente costruito sulla salute dei suoi utenti. Opere che potrebbero contribuire notevolmente alla riduzione della richiesta energetica in questa fase sono il risanamento degli involucri esistenti, una progettazione più adeguata degli involucri in nuove edificazioni, una regolazione del condizionamento estivo, l'introduzione di sistemi di gestione automatizzata e un uso, ove possibile, delle energie rinnovabili. Il risanamento degli involucri permette la riduzione dei consumi per il riscaldamento ed è condizione vincolante per l'installazione del condizionamento estivo.

La *fase di post-consumo*, o di fine vita, inizia quando la vita utile di un edificio è terminata. In questa fase, i materiali da costruzione, demoliti o preferibilmente disassemblati, si trasformano in risorse per altri edifici o rifiuti da restituire alla natura. La strategia di progettazione eco-efficiente si concentra sulla riduzione dei rifiuti da costruzione (che comprende attualmente il 60% dei rifiuti solidi in discarica), riutilizzando sistemi e componenti e riciclando i materiali da costruzione.

Ai requisiti per un progetto sostenibile e alle caratteristiche di un materiale sostenibile si devono valutare le prestazioni di un sistema tecnologico, di un cantiere sostenibile, stabiliti già nel 1999 secondo *Agenda 21 - CIB on Sustainable Construction*, che consistono in:

- *scelta e uso di materiali locali*, ovvero un materiale, un componente o un sistema tecnologico sostenibili in un preciso luogo fisico non sempre lo sono in un altro; va preso in considerazione il riferimento alle culture e a i modi d'uso locali contrapposti all'omologazione dei modi di costruire, quale stile internazionale;
- *marcatatura dei componenti*, ovvero un criterio diffuso nella produzione industriale che permette di risalire al produttore del componente, alle sue caratteristiche tecniche e alle modalità di interfaccia e di esercizio, a cui si aggiungeranno anche le caratteristiche di impatto ambientale;
- *materiali riciclabili*: il riciclo, insieme alle strategie di reimpiego e riutilizzo, costituisce un passo obbligato verso la sostenibilità dei cicli produttivi dei materiali da costruzione;
- *minimizzazione dei trasporti*, valutando le ricadute dell'attività costruttiva sul sistema dei trasporti e sulla qualità della vita dell'intero contesto in cui si opera;
- *sistemi costruttivi facilmente assemblabili/disassemblabili*, che considera un approccio progettuale modulare o per componenti, contemplando il cantiere come luogo di montaggio e smontaggio di componenti di derivazione industriale anziché come luogo di lavorazione di materie prime (acqua, sabbia, ghiaia, cemento) o di materiali (mattoni, blocchi, interposti, ....) che compongono strutture, chiusure, partizioni;
- *sistemi costruttivi riusabili*, che implicano una sfida tecnologicamente complessa, che richiede un aggiornamento dei principi di assemblaggio e di prefabbricazione, ma soprattutto di corretto disassemblaggio selettivo dei componenti da riusare;



- *manutenibilità nel tempo*: la stima della vita utile del prodotto edilizio, diversamente dal prodotto industriale, si misura in molti decenni o in secoli, per cui è importante conoscere approfonditamente gli aspetti di durabilità e contrastare il degrado dei materiali, prevedere la durata dei componenti e gestire gli inevitabili guasti, perseguendo l'allungamento della vita utile (Manfron V. et alii, 2006).

Nella prassi progettuale attuale il sottoporre il proprio progetto anche alle regole di salvaguardia nei confronti dell'ambiente, ovvero al computo dei flussi di materia e energia, all'analisi degli impatti ambientali come conseguenza delle scelte tecniche e materiche, all'individuazione e applicazione di nuove strategie progettuali è letta, nella maggior parte dei casi, come un onere enorme, in senso negativo, oppure come un'opportunità commerciale o speculativa, che rende accattivanti nuovi edifici progettati rispetto alle pratiche tradizionali. Tuttavia qualche impulso positivo va lanciato per far comprendere come questa opportunità debba incoraggiare la prassi progettuale a un rinnovamento, facendo un passo indietro dalla routine di tutti i giorni, che consiste ormai nel risolvere i molti problemi, i vincoli e le complessità, e di ripensare le condizioni al contorno che plasmano i progetti. Piuttosto che cercare di ridurre al minimo il danno ambientale, si deve ambire a concepire la progettazione come un benefico, una forza rigenerativa che crea e valuta le impronte ecologiche per un nuovo esito architettonico e non come ripiego, confidando in modelli di crescita positivi, rigenerativi, non dannosi per la salute ambientale, e ampliando la definizione di qualità del progetto per includere gli effetti positivi sul benessere economico, ecologico e sociale al tradizionale standard progettuale.

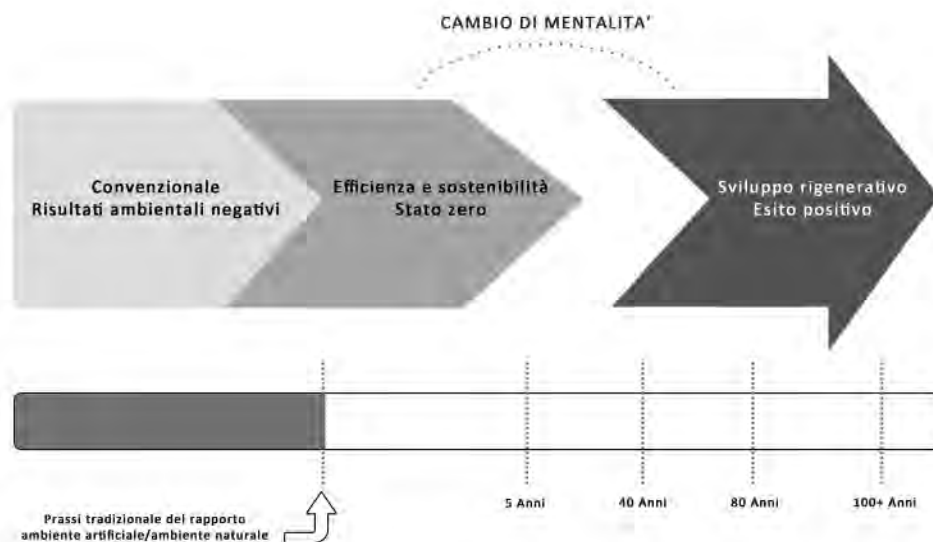


Fig. 1-6: Un trasferimento del modo di pensare, passando dal business tradizionale agli esiti ambientali positivi (grafica di Stefano Aliprandi e Laura Carrera)

## 1.2. Caratterizzazione

Il termine 'caratterizzazione', se associato all'ambiente si identifica nella caratterizzazione ambientale di un sito, ovvero l'insieme delle attività che consentono di ricostruire i fenomeni di contaminazione che hanno influenzato le matrici ambientali acqua, aria e suolo, al fine di ottenere le informazioni di base su cui prendere decisioni realizzabili e sostenibili per la messa in sicurezza del sito. Presumibilmente deriva da questo approccio la scelta di definire la fase di caratterizzazione, nella sequenza metodologica della *Life Cycle Assessment* (ISO 14040), come quella che consente di individuare e pesare all'interno di una singola categoria di impatto (esaurimento delle risorse, salute umana, conservazione dell'ambiente) il tipo di danno relativo alla sostanza emessa o alla risorsa usata in un processo produttivo. Nella metodologia LCA, dopo l'analisi dei flussi, dopo il computo delle quantità coinvolte e la redazione di un inventario di tutte le sostanze in ingresso e uscita da un processo produttivo (di un materiale, di un semilavorato, di un componente, dell'edificio), diventa cruciale la quantificazione dell'impatto generato dall'oggetto analizzato. Segue la fase di classificazione, qualitativa, nella quale i dati dell'inventario vengono suddivisi in categorie di impatti ambientali riconducibili alle tre grandi aree di protezione generale. I dati vengono poi caratterizzati attraverso una serie di calcoli, ovvero convertiti in contributo relativo di ogni singola sostanza emessa o risorsa utilizzata tramite i fattori di caratterizzazione. Questi misurano l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, stabilita sulla base di considerazioni di carattere puramente scientifico. Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale degli impatti del prodotto.

L'obiettivo della caratterizzazione degli impatti ambientali di un processo, legato a un prodotto, sia esso un materiale, un componente o un sistema costruttivo, è di avere delle informazioni per poter prendere decisioni in fase progettuale sui componenti e sulle tecnologie da adottare nella costruzione di un edificio eco-efficiente, che riduca al minimo la sua impronta ambientale.

È fondamentale comprendere come nella fase progettuale, sia necessario caratterizzare il profilo ambientale di materiali o sistemi costruttivi alternativi, effettuando valutazioni comparative LCA, che consentono di supportare la scelta più adeguata rispetto al caso specifico e al contesto di riferimento. Proprio nelle fasi preliminare e definitiva del processo progettuale, in cui il progettista lavora per interpretare l'idea progettuale e determinare le caratteristiche specifiche dell'architettura, l'LCA guida l'azione progettuale e supporta dal punto di vista ambientale le scelte tecniche e materiche e la pianificazione della gestione dell'edificio, con l'opzione di poter fare passi indietro in un continuo processo ciclico di verifica, nel momento in cui alcune decisioni non appaiano allineate con i principi dell'eco-efficienza.

Caratterizzare va interpretato non tanto come il plasmare forme scultoree e irripetibili tali da rendere un'architettura come un riconoscibile segno urbano, ma soprattutto come il determinare la qualità del costruito, nel rispetto del consumo di risorse e di emissioni nocive, con consumi energetici tendenti a zero e con l'impiego di materiali e tecnologie coerenti con le durate previste dell'edificio.

### 1.2.1. Ambiente e cultura materiale

All'interno dell'attività progettuale si intrecciano la cultura sociale (legata alla storia, all'economia e al gruppo sociale in cui l'atto progettuale si concretizza), la cultura individuale del progettista (la sua poetica, il suo linguaggio) e la cultura materiale, ovvero "la conoscenza specifica dei modi e delle tecniche impiegati dall'uomo nel corso dei tempi per costruirsi il proprio ambiente, per risolvere i problemi di sopravvivenza, per organizzare al meglio, secondo le diverse possibilità materiche, la propria esistenza" (Bertoldini, in Bertoldini, Campioli (a cura di) (2009), pag. 28). Le tre accezioni sono legate a tal punto che la trasformazione a livello sociale, generatrice di grandi cambiamenti del *modus vivendi* e quindi delle esigenze dell'abitare e del costruire, sta influenzando direttamente le altre due culture. Nel momento contemporaneo di grande crisi strutturale dei sistemi che hanno guidato la crescita fino ad oggi, di crisi di conoscenza nei confronti del progresso tecnologico (con i suoi disquilibri e i conseguenti danni) e nei confronti della natura (ampiamente e incoscientemente sfruttata, compromettendo le biodiversità e i tempi biologici di rigenerazione), sono in atto forti cambiamenti che si ripercuotono sul processo progettuale e sulla cultura che lo genera. I nuovi paradigmi del progetto, l'efficienza ambientale e la temporalità, sono entrati nel processo in conseguenza alle trasformazioni in atto a livello sociale e alla crescente sensibilità ambientale. Nella fase di superamento del dualismo uomo-natura verso l'accettazione, abbastanza tardiva, dell'indispensabile reciprocità fra civiltà e ambiente, emerge la necessità di una revisione delle strategie costruttive tradizionali, profondamente radicate nella cultura tecnica diffusa. Di conseguenza la cultura materiale assume nuove espressioni, si arricchisce. Essa è la disciplina che tende a mettere in evidenza il patrimonio di idee, di tecniche e di costumi che si trasmettono come espressione collettiva e anonima di un determinato gruppo sociale, con particolare attenzione ai fenomeni infrastrutturali, agli oggetti concreti, ai materiali e al divenire delle catene tecniche. Essa inquadra la conoscenza specifica degli approcci e delle tecniche usate dall'uomo per costruire attraverso le diverse disponibilità materiche. La storia ci ha restituito un repertorio infinito di culture materiali (alcune ancora oggi chiaramente esistenti e identificabili), quale dimostrazione di un costante impegno dell'umanità a dialogare con il suo ambiente. Tale dialogo è venuto meno quando l'uomo non ha accettato i limiti dell'ambiente, ma si è sforzato di superarli degenerando fino all'insostenibilità (Bertoldini, Campioli, 2009). Un *excursus* nella storia dell'architettura fino al modo costruttivo d'oggi consente di constatare il radicale cambiamento avvenuto nella tecnica edilizia e nei suoi materiali, per effetto della irresistibile spinta dei fattori economici e della rapida evoluzione della produzione industriale, in un concatenamento di cause e conseguenze, i cui punti di partenza non sono sempre facilmente rintracciabili. La lenta evoluzione millenaria dell'arte di costruire ha subito così negli ultimi novant'anni una brusca svolta e, in pochi anni, ci ha offerto architetture estranee al loro contesto urbano e ambientale, oltre che a tutto quello precedentemente realizzato nella storia dell'architettura. Conseguenza: un dissolvimento dell'identità materiale rispetto a singole culture e luoghi grazie all'omologazione di stili, materiali e prodotti edilizi sul mercato applicabili a ogni contesto. Se prima l'architettura (in alcuni contesti estremi ancora oggi) era condizionata dalla scelta dei materiali, poi ha raggiunto risultati innovativi tanto maggiori quanto più grandi sono state le difficoltà da superare, costretta ad esprimere la sua creatività, in seguito sono state le nuove realtà di sofisticazione, insieme alle nuove facilità di arricchimento e di comunicazione, a confondere la primitiva chiarezza, così che le architetture sono diventate più formali che funzionali. Tut-

tavia in un'ottica positivista l'affinamento delle caratteristiche fisico-chimiche dei materiali tradizionali, l'invenzione di nuovi materiali e la loro combinazione, la contaminazione con ambiti materici e tecnici diversi e di altre discipline hanno enormemente ampliato la possibilità di scelta oltre i confini geografici di ogni paese, allargando all'infinito il ventaglio di soluzioni adottabili rispetto alle esigenze ambientali e a una coerente formulazione e gestione del costruito. D'accordo con Nervi (1963), che affermava come *"Tutti i materiali possono essere meravigliosi, e la loro bellezza dipende in gran parte o completamente dall'efficacia con la quale vengono utilizzati"*. Per cui di nuovo si torna alla grande responsabilità della fase progettuale, soprattutto in momenti storici in cui è inevitabile un riequilibrio tra funzionalità e forma. In occasioni progettuali e costruttive in cui è prioritaria l'efficienza energetica e ambientale e la stima temporale della durata dell'organismo edilizio e delle sue parti, emergono atteggiamenti in cui la forma viene assecondata rispetto alla funzione, al soddisfacimento di un ridotto consumo energetico, di un comfort interno, di un'attenta interfaccia con la progettazione degli impianti. A questi ultimi aspetti si aggiungono la flessibilità spaziale e temporale, la trasformabilità, l'evoluitività, l'adattabilità quali paradigmi del progetto che collaborano a caratterizzare la forma dell'edificio e la scelta tecnologica e materica. Tali paradigmi completano l'atto costruttivo informando non solo l'essere dell'architettura, ma anche del suo divenire. Una scelta costruttiva, che si coniuga coi paradigmi e con la sensibilità ambientale in un'ottica dell'intero ciclo di vita dell'edificio, deve tradursi in soluzioni tecniche e materiche tali da rendere reversibile il processo costruttivo dell'edificio, nell'ottica della chiusura del ciclo di vita. Emerge di nuovo come il processo costruttivo sia inscindibile dal processo progettuale, con il compito di prevedere tutte le possibili dinamiche del ciclo di vita dell'edificio nel contesto ambientale.

Operando un parallelismo atemporale fra l'evoluzione della cultura materiale e l'analisi degli impatti ambientali si può riflettere sulla realtà passata: sarebbe stata molto più lineare la valutazione degli impatti ambientali in periodi storici differenti in cui la cultura materiale era molto trasparente e strettamente legata i luoghi. Oggi con la complessità dei processi produttivi e delle movimentazioni materiali è difficile raggiungere un quadro chiaro degli impatti ambientali di un materiale. Non siamo spesso a conoscenza delle movimentazioni di un prodotto dalla sua nascita alla sua destinazione al cantiere: un tempo il reperimento era locale quindi si sapeva che la tal pietra arrivava da una determinata cava, oggi è arduo, se non impossibile, avere la carta di identità di un componente edilizio, si voglia per la maggior complessità assunta, si voglia per la geografia intricata dei percorsi dei suoi semilavorati e delle materie prime. Inoltre l'edificio oggi è un organismo con molte più parti rispetto ad un tempo: se pensiamo all'involucro, con la sua stratificazione materica e funzionale, rispetto alla monomatericità e monoliticità di un tempo, dobbiamo interfacciarci con più di un componente, quindi la storia del ciclo di vita dell'involucro si ramifica e moltiplica.

La moltiplicazione dei processi produttivi è stata determinata dall'industrializzazione edilizia, in conseguenza alle trasformazioni che il processo costruttivo e il cantiere hanno subito negli ultimi vent'anni. Partendo dalla constatazione che nel settore industriale quello edilizio è il meno avanzato, soggetto a una lenta innovazione, trasferita da altri comparti, caratterizzato da forti barriere protezionistiche, piccole dimensioni aziendali e un'imprenditorialità prevaricata dalla rendita rispetto al profitto d'impresa, è riconoscibile negli anni più recenti un cambio di direzione, del resto reso inevitabile dalla crisi. Il più forte segnale di cambiamento è dimostrato dall'accorpamento di aziende in grandi gruppi industriali produttori di materiali e componenti. Si tratta di nuovi conglomerati industriali, che spaziano anche in

ambiti materici molto diversi, che tuttavia fanno intravedere la possibilità di sviluppo di una ricerca autonoma, madre di un'innovazione nata direttamente dal settore e per il settore e non trasferita da altre filiere applicative (Sinopoli, 2010). Da sempre in edilizia il nuovo è nato da modifiche di ciò che si conosceva o da prassi in uso e mutava grazie a nuovi saperi, riuscendo raramente a lanciare un'innovazione dall'interno. Fino a vent'anni fa circa il motore dell'innovazione nell'ambito delle tecnologie e delle tecniche costruttive era dare maggiore qualità a un processo e a prodotti edilizi ancora carenti. Ma l'emergenza ambientale e energetica hanno messo in discussione il *modus operandi* basato su materiali, manodopera e energia a basso costo e ha obbligato a un cambio di direzione. Non ci si può più preoccupare di pescare dalla grande piattaforma di possibili prodotti quelle più efficaci e a minor costo (senza un confronto con il contesto e il divenire dell'edificio), ma bisogna optare per soluzioni eco-efficienti rispetto alla situazione specifica in cui si sta operando e rispetto al futuro dell'ambiente. Nicola Sinopoli (2010) individua alcune traiettorie innovative per il mondo delle costruzioni, partendo dai termini 'natura, ecologia e sostenibilità' che rappresentano la trasformazione in atto nel passaggio di secolo e la modificazione profonda dei paradigmi del costruire. Con uno sguardo alla cultura materiale, alle tecnologie, ai procedimenti di cantiere, emergono nuove traiettorie che prevedono un ritorno materico al naturale e a un nuovo legame con i luoghi, percorrendo il processo che ha visto l'evoluzione "dal naturale all'artificiale". Si manifesta da un lato la tendenza "verso una materia su misura", secondo cui per forme e prestazioni specifiche, a volte uniche, è possibile progettare il materiale, dall'altro la logica di avere "materiali clandestini nel cantiere globale".

### 1.2.2. La caratterizzazione dei sistemi per il progetto dell'edificio nel contesto

Considerata l'ampiezza di possibilità materiche e di soluzioni tecniche offerte dal mercato per il progetto e la costruzione dell'edificio, è compito arduo individuare scelte con caratteristiche adeguate al contesto di riferimento, dal punto di vista funzionale, economico e soprattutto ambientale. È necessaria una cognizione cosciente e coerente da parte dei progettisti sulle caratteristiche dei componenti edilizi, sulle prestazioni attese e sul loro impatto ambientale, e un'osservazione critica della loro reale validità, ai fini di scelte tecnologiche consapevoli. Il mercato sembra premiare dei prodotti che non affrontano la complessità del problema, ma la tamponano solo apparentemente, rispondendo spesso alle tendenze o alle "sintomatologie del momento". Questo atteggiamento crea soltanto ulteriore confusione e poca chiarezza e superficialità<sup>2</sup>. La scelta di un componente non deve essere solo determinata dalla rispondenza a una funzione, ma nell'ottica più ampia dell'uso che ne verrà fatto, un uso specifico legato al contesto ambientale, temporale e sociale. Oltre alla domanda 'quale forma per quale funzione', vanno immediatamente correlati 'quale tecnologia per quale edificio' e 'quale materiale per quale contesto'. Il contesto, oltre che in senso statico

---

2. Sono molti i tentativi di rispondere alle istanze ambientali nei progetti di architettura, tuttavia spesso la compatibilità ambientale degli edifici è usata solo come espediente per il successo e la realizzazione dell'edificio. Significativa è la riflessione di P.F. Butera (1995) che, nell'introduzione al testo *Architettura e Ambiente*, ETAS, Milano, commenta gli esiti di un concorso di progettazione, in cui un approccio bioclimatico era ben accetto: "il motivo che portava la commissione a escludere un progetto era la assoluta mancanza di qualsiasi dimensionamento. Le idee erano buone, i principi applicati correttamente, in pratica i risultati attesi non si sarebbero mai realizzati [...] Si vedeva chiaramente che le fonti di informazione, a cui avevano fatto riferimento i concorrenti, erano solo di tipo qualitativo; il che va bene per capire il fenomeno, ma non va bene affatto quando si passa al progetto".

(il luogo fisico), è legato all'uso e ai fruitori in senso dinamico, con modificazioni e approcci differenti nel tempo. Un edificio nasce da un progetto specifico, localizzato, pertinente ad una cultura tecnica e materiale che è, anche se non derivante complessivamente, almeno in parte relazionata alla società che la produce. Una corretta valutazione del livello di efficienza ambientale di una determinata scelta progettuale non può prescindere dal considerare le risorse che vengono consumate e gli impatti che si producono lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio. Le soluzioni materiche e tecniche devono essere caratterizzate considerando l'intero ciclo di vita dell'edificio: valutazione degli impatti ambientali generati per la produzione di materiali e componenti confrontata con la stima dei consumi energetici e delle emissioni nella fase operativa e con una preventiva quantificazione delle energie e degli impatti della fase di fine vita (Hill, Bowen, 1997). In una riflessione sul ruolo della tecnologia nel progetto di architettura a introduzione del Laboratorio di Costruzione di Sergio Pone (2010), rifacendosi alle teorie di Eduardo Vittoria (1988), sottolinea come nel progetto non possa essere dato per scontato il momento costruttivo, meramente rinviandolo ai processi tradizionalmente acquisiti e gestibili in cantiere. La tecnica invece può e deve travalicare, nella formazione del progetto, i soli aspetti di "messa in opera" della costruzione. Non è più solo mero strumento di organizzazione dei materiali, deve essere essa stessa "materiale del progetto", in particolare in momenti in cui *"il suo potenziale è così vasto da renderla potenzialmente salvifica (l'architettura di carta di Shigeru Ban per i terremotati di Kobe), o palesemente distruttiva (come il kitsch mitomaniaco delle "Palm Island" di Dubai). In quanto creazione, la tecnologia fa proprie le finalità dell'architettura e tramuta quest'ultima in una produzione di spazio che non è più solo fabbricazione (...). Essa investe non soltanto i mezzi materiali del fabbricare, ma tocca direttamente la forma espressiva facendo di ogni problema di architettura anche un problema di ecologia"*. (Eduardo Vittoria, 1988). Quindi grazie alla consapevolezza della consistenza e dei comportamenti di alcuni materiali, oppure alla conoscenza esatta della filiera produttiva del funzionamento delle macchine e dei processi necessari per lavorarli o anche al padroneggiare i cataloghi degli elementi offerti dalla produzione industriale e alla capacità di contestualizzarne la scelta nei termini del progetto di architettura si sostanzia l'atteggiamento progettuale che architetti come Renzo Piano o Peter Zumthor fanno discendere da una "fabrilità colta e attrezzata".

Non è sufficiente caratterizzare la scelta dei materiali e dei componenti per l'edificio sulla base di certificazioni di prodotti, marcatura di qualità CE dell'azienda produttrice o su schede tecniche validate da punteggi sul livello di eco compatibilità del prodotto. È necessaria estrema consapevolezza del profilo ambientale del componente contestualizzato rispetto all'edificio in cui verrà collocato; una scelta di un componente va verificata ogni volta che si decide di inserirlo in un edificio collocato in un contesto rispetto ad altri. Ogni progetto, quindi ogni edificio, ha una storia a sé rispetto ad altri o rispetto al contesto in cui si costruisce. Per esempio scegliere il legno come materiale da costruzione, sia per le strutture che per altri componenti dell'edificio, non ha una correlazione diretta la realizzazione di un edificio eco-compatibile, contrariamente a molti luoghi comuni nel settore, in cui lo slogan è 'costruire con il legno è costruire ecologico'. Il legno sicuramente è eco-compatibile poiché ha un bilancio complessivo di emissioni di anidride carbonica nullo, tuttavia è necessario che ogni territorio, ogni nazione disponga di foreste coltivate a sufficienza per rispondere ai bisogni. Le politiche ambientali in diverse nazioni hanno risposte contrastanti al tema: i Paesi Bassi, attivi e sensibili al tema ambientale dagli anni Settanta, valutano penalizzante l'uso intensivo del legno nelle costruzioni e le ragioni sono motivate dal fatto che l'estensione

territoriale di quella nazione non consente di disporre di foreste per poter coltivare il legno; il suo uso quindi implica il reperimento del materiale (con il tragitto più corto), in Scandinavia, con conseguenti consumi legati ai trasporti. Realtà diametralmente opposta è quella della Nuova Zelanda, in cui il governo con il supporto di ricerche condotte nella University of Canterbury a Christchurch, sta promuovendo l'uso esclusivo del legno quale materiale strutturale adeguato anche per realizzare costruzioni multipiano di dimensioni consistenti, sia residenziali che per il terziario, grazie a nuove tecnologie costruttive in legno (anche antisismiche). Gli studi di ricerca sono volti a informare su quale sia la più grande quantità di legno che può essere utilizzata su larga scala nelle costruzioni e in edifici commerciali in Nuova Zelanda e a fornire informazioni Life Cycle Assessment (LCA) sui benefici dell'utilizzo del legno in edifici sostenibili. Altri studi illustrano i vantaggi dell'utilizzo di materiali in legno in Nuova Zelanda, con i vantaggi a livello nazionale di riduzione dei consumi di energia fossile da carburante e le emissioni di CO<sub>2</sub>, grazie all'importanza dell'attività di silvicoltura<sup>3</sup>.

Questa politica è calzante per la situazione neozelandese, il cui territorio, non così urbanizzato come l'Italia, è per la maggior parte ricoperto di foreste, in cui la silvicoltura è una prassi attiva e funzionante da molti anni; quindi l'autosufficienza di legno è assicurata dai cicli di ri-piantumazione. Inoltre va considerato che la maggior parte dell'industria delle costruzioni è basata sulla tecnologia del legno, senza creare grossi squilibri interni con i settori legati agli altri materiali strutturali. È sicuramente una gestione intelligente delle proprie risorse, tuttavia risulta una politica difficilmente proponibile in tante altre realtà territoriali. Pensando all'Italia, di dimensioni territoriali simili, ma con una storia molto diversa e una densità di urbanizzazione elevata, non sarebbe possibile pensare a un'autosufficienza nell'approvvigionamento di legno. Questo implicherebbe rifornimento di materie prime dall'estero, abbattendo i vantaggi che gli studi neozelandesi hanno dimostrato per il loro contesto. L'individuazione di criteri per la selezione di materiali e componenti edilizi a basso impatto ambientale è operazione ardua, ma necessaria a comprendere la relazione fra il progetto e l'efficienza ambientale. Assistiamo a strategie comunicative che vantano materiali ecologici quelli che hanno semplicemente un'origine naturale; che promuovono prodotti etichettati come ecologici poiché presentano caratteristiche qualificanti in termini di efficienza ambientale sulla base di sistemi autoreferenziali di istituti o associazioni di diverso genere; che valutano sostenibili componenti o sistemi costruttivi in quanto reversibili o riciclabili a fine del ciclo di vita. L'ambiguità, che permea nella selezione dei componenti adeguati all'edificio e al contesto in cui si opera, consiste nel dichiarare eco-compatibile una soluzione rispetto a altre solo poiché soddisfa un requisito ambientale.

Al fine di regolamentare questi atteggiamenti pericolosi e poco chiari, il tentativo in atto intende definire procedure e indicatori ambientali per veicolare la selezione e diffondere le

---

3. Gli studi di Andy Buchanam, University of Canterbury, Christchurch (2009) dimostrano il beneficio significativo per il territorio, se combinato con il ridotto contenuto di carbonio e la bassa energia racchiusa nei componenti in legno, di utilizzare il legno quale occasione di recupero di energia termica da rifiuti di legno (provenienti da tutte le fasi di raccolta e lavorazione, dalla costruzione e demolizione di edifici in legno). Questa energia può essere utilizzata al posto di combustibili fossili, riducendo così le emissioni di CO<sub>2</sub>, soddisfacendo i requisiti del Protocollo di Kyoto. Un altro studio di valutazione LCA (S. John, A. Buchanam, N. Perez, 2009), che paragona legno, acciaio e calcestruzzo come materiali strutturali in edifici multi piano, afferma che l'utilizzo di materiali di legno riduce le emissioni nette di carbonio associate con tali costruzioni. Infatti i materiali da costruzione in legno forniscono una permanente riduzione netta di carbonio dall'atmosfera, per cui gli edifici multipiano in legno possono avere un impatto ambientale notevolmente inferiore a quelli di acciaio o in cemento armato.

etichettature ambientali di prodotto per disporre di una informazione ambientale completa in fase di scelta progettuale, come la Dichiarazione Ambientale di Prodotto (*Environmental Product Declaration* – ISO 14045:2006<sup>4</sup>). Tuttavia la perplessità, in un ambito poco certo e perimetrato nelle metodologie, è di adottare metodi inadeguati e dati poco attendibili, con una variabilità dei risultati davvero arbitraria. Sono spesso fuorvianti le informazioni ambientali contenute nei messaggi pubblicitari, nelle schede tecniche delle aziende o trasmesse nei sovrabbondanti convegni sul tema ambientale. Il problema della sostenibilità non può essere parcellizzato, vanno considerati molteplici indicatori per dichiarare l'eco-efficienza di soluzioni tecniche rispetto ad altre. La definizione degli indicatori ambientali da considerare nel settore delle costruzioni è una questione aperta, tuttavia la problematica non può essere banalizzata o semplificata attraverso sistemi *user friendly* e di semplice manipolazione.

Una peculiarità tipica del settore edilizio, in cui gli edifici quali organismi complessi non sono del tutto simili al funzionamento non meno complesso di oggetti quali le automobili, per esempio, sottolinea come l'eco-efficienza di un prodotto o componente non equivalga all'eco-compatibilità dell'edificio. Infatti l'eco-compatibilità non è una caratteristica stimabile a livello di prodotto, ma dipende dall'uso del prodotto (condizioni contestuali e di utilizzo, prestazioni e durata attese, ...). Per esempio, nell'affidarsi alla scelta dei prodotti di matrice naturale e rinnovabile, non processati con lavorazioni industriali, occorre verificare le prestazioni del materiale in opera (resistenza meccanica, al fuoco, sicurezza, durata, salubrità...), per non incorrere in scelte progettuali errate rispetto alle esigenze di uso e durata.

Altro aspetto, non meno importante, è la consapevolezza della natura dei prodotti, monomateriali o compositi, che si scelgono per un progetto. I requisiti sono sempre maggiori e dettagliati e la tendenza è di produrre componenti frutto dell'accostamento di materiali di origine diversa per offrire prestazioni migliori. Quindi passando da monomateriali a materiali compositi, siano pure di origine naturale, non si può affermare con certezza la loro eco-efficienza, infatti i processi di lavorazione per l'accostamento e la collaborazione di materiali diversi possono coinvolgere sostanze di natura differente, con impatti ambientali diversi. È anche necessario andare oltre determinati preconetti e valutare l'ecologicità di materiali e componenti in un quadro allargato: per esempio l'accezione 'sintetico' o 'di natura chimica' sono spesso considerati svantaggiosi rispetto ai termini 'naturale' o 'minerale', tuttavia, nel ciclo di vita del materiale, una plastica riciclabile è da considerare più sostenibile, rispetto a un materiale composito, pur di origine naturale, che a esaurimento della sua funzione può solo essere conferito in discarica. E ancora un prodotto che richiede molta energia per la sua produzione, ma con una buona durata, può presentare un profilo ambientale migliore di uno che subisce poche lavorazioni per il suo confezionamento e è però facilmente degradabile in tempi limitati.

---

4. (EPD - Environmental Product Declaration) è uno schema di certificazione volontaria, nato in Svezia ma di valenza internazionale, che rientra fra le politiche ambientali comunitarie (Politica Integrata di Prodotto-IPP). È sviluppata in applicazione della norma UNI ISO 14025:2006 (Etichetta Ecologica di Tipo III) e rappresenta uno strumento per comunicare informazioni oggettive, confrontabili e credibili relative alla prestazione ambientale di prodotti e servizi. Le prestazioni ambientali dei prodotti/servizi riportate nella EPD devono basarsi sull'analisi del ciclo di vita mediante utilizzo del Life Cycle Assessment (LCA) in accordo con le norme della serie ISO 14040, fondamento metodologico da cui scaturisce l'oggettività delle informazioni fornite. Tali informazioni hanno carattere esclusivamente informativo, non prevedendo modalità di valutazione, criteri di preferibilità o livelli minimi che la prestazione ambientale debba rispettare.



Il progresso nel settore edilizio spinge nel massimizzare l'efficienza tecnica del prodotto, ma soprattutto nell'intensificare l'uso, allungando la sua vita utile e creando le condizioni per un tasso di utilizzo massimo: questo ovviamente significa non solo concepire nuovi prodotti, con un'efficienza intrinseca, ma anche incidere sulle modalità d'uso dei prodotti edilizi, stimolando comportamenti e scelte di consumo più sostenibili. Infatti l'efficienza ambientale di certi prodotti è relativa al contesto di produzione e di impiego, all'interfaccia con gli altri componenti dell'edificio, alle condizioni di esercizio e dal comportamento nel tempo degli stessi. Tali variabili sono inscindibili con la scala dell'edificio e di difficile definizione alla scala del prodotto, fuori da un contesto di riferimento preciso. Se da un lato si sta lavorando per portare chiarezza e armonizzazione nella scelta degli indicatori ambientali da considerare nella valutazione degli impatti ambientali di prodotti e sistemi costruttivi, dall'altro lato vi sono nuove forme progettuali di caratterizzazione dei sistemi per l'edificio, che, quando saranno recepite nella prassi progettuale diffusa, bene si integreranno con l'LCA, supportandosi a vicenda nella verifica delle scelte progettuali tecniche e materiche. Si tratta di nuovi approcci della progettazione parametrica che, insieme all'interoperabilità (iBIM), riguarda il tema alla sostenibilità ambientale, concentrandosi in particolare sulla progettazione efficiente degli involucri degli edifici e sulla riduzione dell'impatto ambientale. Utilizzando tecniche avanzate di modellazione termica, analisi del vento, progettazione acustica, solare e studi di abbagliamento, consente di proporre diverse possibili configurazioni per l'involucro. Per esempio, da sempre l'involucro è stato progettato per far fronte alle diverse condizioni climatiche: il clima caldo e umido richiede aperture ampie per favorire la ventilazione d'aria, mentre il clima caldo e arido richiede piccole aperture e elevata massa termica per ridurre il trasferimento di calore. Tali soluzioni, storicamente fondamentali nella progettazione di architettura, sono di tipo statico. Il mondo della ricerca sta cercando di scoprire nuovi involucri reattivi – adattivi, le cui configurazioni dipendono dai dati climatici o gli utenti. Se le condizioni ambientali o funzionali cambiano durante la vita di un edificio, l'obiettivo (futuristico) della ricerca è di realizzare involucri *time-based* adattabili: per esempio, se in un edificio vi è una sala di lettura che deve diventare una camera da letto, la condizione ambientale in questa stanza ha bisogno di cambiare, ovvero da molto illuminata dovrebbe essere completamente ombreggiata, dovrebbe essere tranquilla, per cui la sfida progettare è un involucro in funzione del tempo, sia dal punto di vista fisico che digitale, che si trasforma durante la vita utile (Teuffel, 2009). Si pensa a un sistema edificio in grado di interagire con le circostanze ambientali, dipendenti dalla quarta dimensione, il tempo, per creare sistemi ad alte prestazioni "adattivi", prendendo esempio dai complessi, ma ben strutturati e funzionalizzati sistemi naturali, ottimizzati in milioni di anni, in cui l'integrazione di diverse discipline e funzioni si autoregola. Filoni di ricerca sul design innovativo e integrativo si stanno impegnando proprio sui sistemi "adattivi", con particolare attenzione ai sistemi naturali, integrando le conoscenze sugli involucri edilizi e sull'"organismo edilizio", quelle della progettazione del clima con strumenti di simulazione e architettura interattiva e informazioni su possibili sviluppi di nuovi materiali a memoria di forma. I processi adattivi possono essere regolati da diverse strategie, anche interagenti fra loro: secondo l'interazione edificio-ambiente, secondo l'interazione utente-edificio, secondo strategie solari, secondo l'intensità della luce del giorno, su principi di acustica, secondo i venti, il guadagno e l'accumulo di energia e secondo il controllo strutturale. Una prospettiva che vede l'edificio pari a un essere vivente.

Parallelamente anche nella sfera della ricerca e dello sviluppo della metodologia LCA si manifestano i primi tentativi per rendere dinamica la valutazione, ovvero che non fotografi

solo una situazione in un dato momento, ma riesca a simulare gli impatti ambientali in conseguenza alle modificazioni variabili nella fase d'uso: è il concetto di un LCA dinamico per gli edifici, che considera le variazioni temporali delle condizioni interne ed esterne durante la vita operativa di un edificio, e che incorpora la possibilità di aggiornare rapidamente i risultati della valutazione LCA in base alle modifiche nella fase progettuale dell'edificio o durante la fase operativa (modellazione di uno scenario dinamico) (Collinge et al., 2011). Un inquadramento relativo alla valutazione del ciclo di vita (LCA) è necessario per capire come gli edifici ed i loro occupanti utilizzino materiali, acqua e risorse energetiche, e siano influenzati dalla qualità ambientale interna dell'edificio per tutta la sua durata. Le ipotesi di fattibilità contemplano la distribuzione di una rete wireless di sensori in tempo reale, per generare un LCA dinamica per edifici. Utilizzando i dati raccolti dalla rete, le previsioni di impatto ambientale in fase di utilizzo possono essere validate o migliorate. Nel caso di risultati rilevati in cui sistemi costruttivi dimostrano un impatto molto variabile sugli esiti di una LCA o che divergono notevolmente dalle previsioni attuali, tali sistemi possono essere selezionati per ulteriori studi, e scelte mirate alla limitazione degli impatti e del consumo di risorse possono essere raffinate con applicazioni di sensori preimpostati.

### ***1.2.3. La caratterizzazione della durata di sistemi e componenti per una gestione progettata***

Nello scenario tradizionalista delle costruzioni fatte per durare nel tempo, si moltiplicano gli esempi di interventi rivelatisi di breve durata, a causa di errori di costruzione, di uso di materiali scadenti, di espressioni estetiche pretenziose e di mancata programmazione della manutenzione. Qualsiasi caso influisce negativamente sulla qualità dello spazio pubblico e sull'immagine urbana (non va dimenticata la grande responsabilità civile dello spazio pubblico). Sempre più spesso si manifestano insuccessi legati alla scadente qualità costruttiva, anche negli edifici di nuova realizzazione, a cui si aggiungono (forse nemmeno considerata in fase progettuale) condizioni microclimatiche insostenibili (caldo o freddo estremi in uno stesso contesto, dovuti ai cambiamenti climatici), formazioni di muffe e condense, umidità di risalita, fessurazioni, distacchi di rivestimenti, infiltrazioni d'acqua, micro cedimenti strutturali, fenomeni di incompatibilità chimica, fisica e meccanica fra materiali, etc. Tali guasti sono il risultato da un lato della naturale obsolescenza prestazionale di materiali e componenti, dall'altro dalla mancata integrazione tra progettazione architettonica, tecnologica e processo di messa in opera (Lauria, 2008).

Del resto Le Corbusier (1933), già negli anni Trenta, aveva previsto esattamente la complessità degli scenari attuali, quando rifletteva sulle tecniche moderne di costruzione, quali generatrici di nuovi metodi, nuovi apparati e facili mezzi, di nuove dimensioni, aprendo un nuovo ciclo nella storia dell'architettura. Comprendevo le possibilità costruttive, per cui le costruzioni sarebbero divenute di un'ampiezza mai vista prima, ma allo stesso tempo molto più complesse; per cui l'architetto si sarebbe dovuto avvalere di numerosi specialisti, in tutte le fasi del lavoro. I tradizionali metodi di progettazione e il paradigma della durata sono stati sconvolti da tutti i cambiamenti in atto negli ultimi decenni, con l'opinione ormai metabolizzata sulla necessaria opportunità di programmazione del ciclo di vita degli edifici quale azione strategica da adottare per gestire meglio il patrimonio costruito.

All'aumento di prestazioni richieste, alla necessità di risposta alle normative sempre più restrittive, ai nuovi modi d'uso degli edifici, corrispondono nuovi sistemi tecnologici e co-

struttivi e materiali evoluti. A questi però non corrispondono dati da test di laboratorio che verifichino la durabilità dei materiali singoli e delle stratificazioni d'involucro. Quando esistono prove di laboratorio, cicli accelerati d'uso e di esposizione a gelo e disgelo, non sempre sono affidabili rispetto alle variabili del contesto ambientale e alla durata imposta, per cui la conoscenza del periodo di durabilità di un elemento tecnico o di un componente non è sufficiente a prefigurare la durata e il ciclo di vita del sistema in cui sono inseriti. Inoltre occorre tenere presente che i materiali e componenti edilizi raramente hanno lo stesso comportamento nel tempo o la stessa durata dell'edificio. Il decadimento della prestazione nel tempo e, soprattutto, le azioni di ripristino della prestazione stessa dipendono dalle caratteristiche del sistema e hanno un'incidenza sulle risorse consumate e sugli impatti complessivamente prodotti che non può essere trascurata.

La relazione tra efficienza ambientale, durabilità e previsione di vita utile dei sistemi edilizi è un tema di confronto aperto tanto sul fronte degli studi sulla durabilità di materiali e componenti, quanto su quello della ricerca nell'ambito della valutazione delle prestazioni ambientali nel ciclo di vita dell'edificio.

I metodi per valutare la sostenibilità ambientale di una costruzione e per computare la relativa efficienza energetica nella fase d'uso spesso non tengono in considerazione il decadimento prestazionale dei materiali e dei componenti che la compongono. Tuttavia, l'influenza della durata e del degrado prestazionale dei materiali edili può determinare variazioni significative sulla prestazione energetica durante il ciclo di vita dell'edificio, oltre che sulla gestione della manutenzione. Oggi questi aspetti stanno finalmente guadagnando spazio all'interno delle logiche che presiedono ai processi di valutazione dell'efficienza ambientale dei sistemi edilizi, e il riferimento alla metodologia LCA, ancorché secondo declinazioni differenti, si sta affermando e consolidando. È importante avere informazioni sulla durabilità e vita di servizio di materiali, elementi costruttivi e sistemi tecnologici per valutare gli impatti generati dai necessari cicli di manutenzione nell'LCA.

Occorre, inoltre, sottolineare come la complessità della soluzione costruttiva abbia un ruolo determinante nel condizionare il comportamento nel ciclo di vita dell'edificio. Soluzioni particolarmente articolate sono infatti caratterizzate da un impatto più elevato qualora non sia ipotizzabile un'identica durata per tutti i componenti utilizzati: intervenire per la sostituzione di un componente usurato caratterizzato da una vita breve in molti casi impone anche l'intervento di sostituzione di componenti che invece avrebbero una vita molto più lunga. Tuttavia è ragionevole pensare anche che la complessità di un componente, alla quale corrisponde solitamente un assemblaggio più semplice (es. serramento o pareti prefabbricate pre-assemblate), permetta di conservare i livelli prestazionali certificati in azienda; invece un componente meno complesso (es. membrana di barriera al vapore e una guaina impermeabilizzante) implica una fase di messa in opera che pregiudica sensibilmente le caratteristiche prestazionali in fase d'uso (Lauria, 2008).

Uno degli strumenti di valutazione dell'impatto ambientale degli edifici che, per primo ha considerato la durabilità come passaggio indispensabile per determinare il carico ambientale, è il LEED in Canada: infatti contempla nella sua procedura il *LEED Canada Durability Credit MR 8: Durable Building*. Richiede un piano di gestione della durabilità, una durata pari alla metà della durata dell'edificio per i materiali e componenti da riparare con costi consistenti e uno schema tabellare dettagliato sulla durata di vita progettata per tutti i componenti dell'edificio. Da ultimo prevede una documentazione del processo di assicurazione della qualità dell'oggetto costruito.

Sempre in Canada il *Canadian Green Building Challenge CAGBC* ha riconosciuto l'importanza delle durabilità negli edifici eco-sostenibili, tramite la norma *Durability - CSA Standard S478-95* (2001): questa linea guida considera gli agenti e i meccanismi relativi alla durabilità e fornisce indicazioni per inserire i requisiti di durabilità negli aspetti decisionali della fase progettuale, nella gestione della fase operativa e della manutenzione. Quindi la norma impone la definizione della vita utile prevista (*Predicted service life*): - deve basarsi sulle condizioni ambientali assunte e sulle procedure previste per l'installazione, la gestione e la manutenzione. La valutazione della vita utile può essere fatta tramite dimostrazioni sul campo, modellizzazione del processo di deterioramento e test di laboratorio per validare i dati.

A livello normativo, vi sono prescrizioni riguardo all'obbligo di assicurare durate ai componenti degli edifici (soglie minime) e, a livello applicativo, è possibile fare riferimento a banche dati che riportano le durate tipiche di componenti edilizi, basate sulla media di anni riscontrati nella prassi corrente. Uno dei requisiti essenziali della direttiva europea sui prodotti da costruzione (CPD) è la durabilità dei prodotti, definita come la capacità di un prodotto di mantenere le prestazioni richieste per un dato periodo di tempo o a lungo termine, sotto l'influenza di azioni prevedibili, soggetto a normale manutenzione (Eurocodice 2004). Come dice la definizione le prestazioni richieste in fase di progetto vanno mantenute, per cui il mantenimento nel tempo della qualità edilizia è un obiettivo fondamentale per tutti i principali operatori del settore edilizio (committenza, progettisti, costruttori, fornitori e gestori).

A livello normativo la ISO 15686<sup>5</sup> – Parte 1 e Parte 2 esplica i principi per la pianificazione della vita utile (*Service Life Planning - SLP*) per diverse tipologie edilizie, componenti e tecniche di assemblaggio. In questa parte della norma viene chiaramente esplicitato il modo e il momento in cui "introdurre" gli aspetti ambientali nella progettazione dell'edificio, offrendo un procedura per valutare gli impatti ambientali delle possibili scelte progettuali e identifica l'interfaccia tra l'analisi ambientale del ciclo di vita LCA (*Life Cycle Assessment*) e la pianificazione della vita utile SLP. L'approccio offerto dalla norma suggerisce di comparare più soluzioni tecniche per il progetto, tendendo in considerazione i fattori rilevanti che emergono dalla pianificazione della vita dell'edificio. Nel contesto italiano sul tema della durabilità e sui metodi per la sua valutazione in relazione ai componenti edilizi è uscita la norma UNI 11156:2006<sup>6</sup>. La norma applica un approccio di tipo esigenziale- prestazionale per definire e valutare la qualità in edilizia: alla qualità nel tempo associa il termine 'durabilità' dei componenti edilizi e la definisce come "*misura del grado di rispondenza delle prestazioni dell'opera realizzata ai requisiti che ne hanno guidato la concezione, la progettazione, la produzione, la costruzione e la gestione*".

5 . ISO 15686 *Buildings and constructed assets - Service life planning*

6. UNI 11156:2006– *Valutazione della durabilità dei componenti edilizi (parte 1 – Terminologia e definizione dei parametri di valutazione; parte 2 – Metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità; parte 3 – Metodo per la valutazione della durata (vita utile))*, redatta in coerenza con le indicazioni della norma internazionale ISO 15686. Ampia argomentazione in merito è consultabile nel testo "Durabilità dei componenti edilizi" (AA.VV, 2008), che raccoglie il lavoro svolto in collaborazione con l'UNI dall'Unità di Ricerca "Evaluation and control of technical quality of components and technological subsystems and buildings" del Dipartimento BEST del Politecnico di Milano.

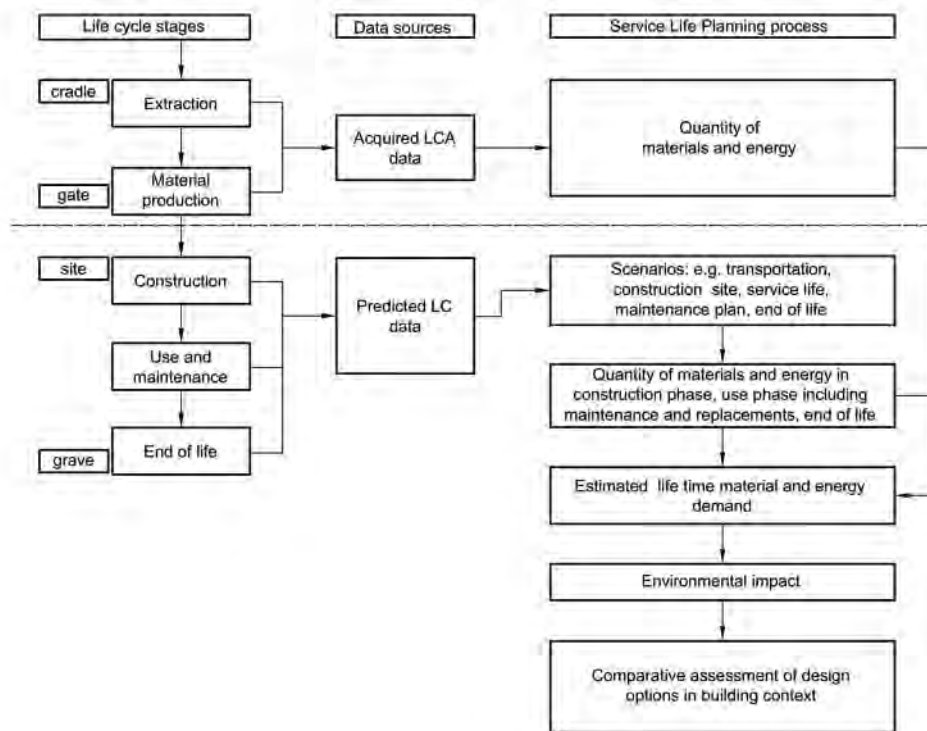


Fig. 1-7: Stralcio dalla norma ISO 15686 – parte 6 – Fasi del ciclo di vita, origine dei dati e processo di pianificazione della vita utile (Fonte: ISO 15686 - parte 6, 2004)

La conoscenza della durabilità (durata di vita e affidabilità) dei componenti edilizi consente da un lato di considerare le obsolescenze in tempi e modalità diversi per i componenti e sottosistemi dell'edificio; e dall'altro di programmare gli interventi manutentivi. Una stima dell'affidabilità nel tempo della durata prevista per i componenti dell'edificio permette di stabilire la tipologia manutentiva ottimale e il rischio di guasti durante la vita utile. Vi sono però guasti legati a "patologie" di progetto o di messa in opera dei componenti che non sono sempre così prevedibili e richiedono a volte interventi manutentivi o sostitutivi non programmabili (Maggi, in Aa.Vv., 2008, p. 7).

Il requisito della durabilità, nell'ottica della valutazione del ciclo di vita di un edificio, entra in gioco, dal momento della consegna dell'opera costruita, durante la fase operativa e di manutenzione. La vita utile di un edificio può avere diversi scenari di andamento (figg. 1-8 e 1-9).

Dopo la consegna, la prestazione iniziale, se lasciata senza interventi di manutenzione, tende a diminuire nella fase operativa, a causa del deterioramento o semplicemente del fattore tempo. Perciò, le costruzioni e i relativi sottosistemi e componenti sono soggetti a varie azioni correttive, alla manutenzione, per ripristinare le condizioni di performance pressoché iniziali. Tali azioni possono essere preferibilmente preventive o, come avviene nella maggior parte dei casi, "curative" di danni ormai manifesti. In entrambi i casi ispezioni periodiche e

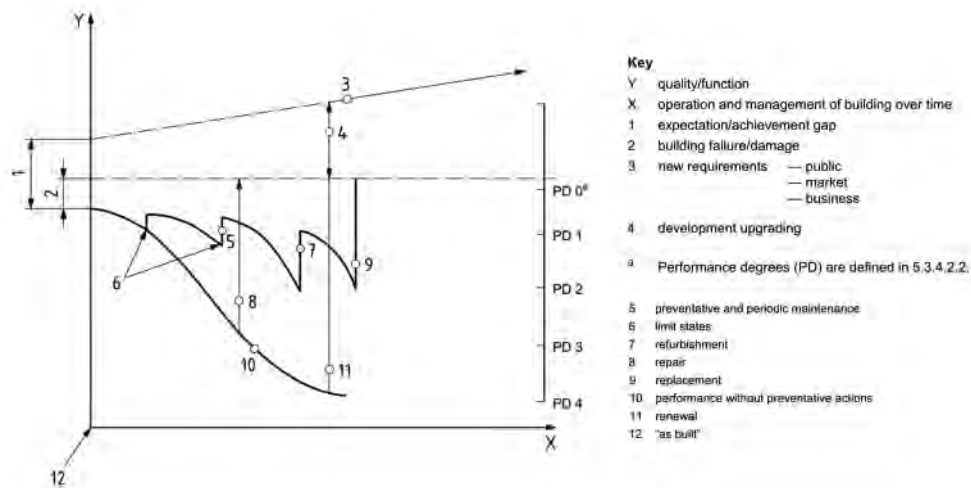


Fig. 1-8: Prestazione nel ciclo di vita delle costruzioni (Fonte: ISO 15686 – Parte 7, 2005)

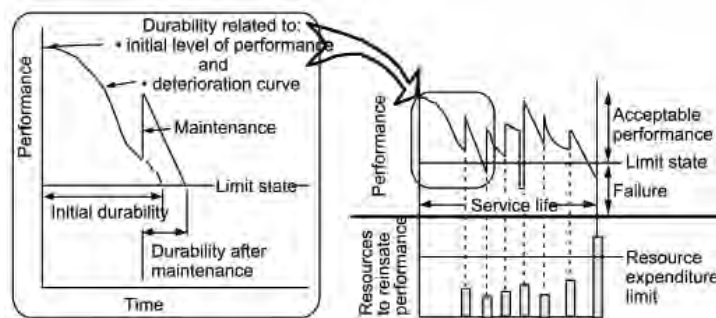


Fig. 1-9: Durabilità e manutenzione nel ciclo di vita dell'edificio (Fonte: Lucuik, 2007)

valutazioni dei livelli di prestazione dovrebbero essere la base per un piano di manutenzione<sup>7</sup>. A tal proposito Claudio Molinari (2002, 2011) ha per anni indagato il tema della manutenzione edilizia, sottolineando in più occasioni la sua centralità rispetto alla complessità progettuale e gestionale degli insediamenti e introducendo la manutenzione come requisito di progetto<sup>8</sup>. Ha avviato un processo di sistematizzazione teorico-applicativa del quadro di conoscenze inerenti al tema della manutenzione edilizia, sia interpretativo sia operativo sul tema dei metodi, delle procedure e degli strumenti per la pianificazione della manutenzione edilizia. Oltre alla previsione e programmazione della vita utile e di servizio di un edificio,

7. Per un maggiore approfondimento riguardo la pianificazione e previsione della vita utile la parte 7 della norma ISO 15686 tratta i metodi per il calcolo della vita utile prevista di componenti e edifici (cfr. "terms and definition" pag. 1; "service life planning" pag. 3, parte 7 5.3.5.2 "Prediction of (residual) service life" pag 13).

8. Il piano di manutenzione rappresenta oggi uno strumento fondamentale per orientare e organizzare le attività conoscitive, decisionali e operative connesse con l'elaborazione e l'attuazione di strategie di manutenzione programmata, assume come riferimento le linee guida tracciate dalla norma Uni 11257:2007 "Criteri per la stesura del piano e del programma di manutenzione dei beni edilizi - Linee guida".

è importante disporre di una conoscenza approfondita di anomalie e guasti che nel tempo possono insorgere nelle unità tecnologiche dell'edificio, e delle dinamiche prestazionali, durante l'intero ciclo di vita dei sistemi, tramite la previsione dell'aspettativa di servizio dei componenti edilizi. A livello applicativo, è possibile fare riferimento a banche dati basate sulla media di dati tipici riscontrati nella prassi riguardo alla durata di materiali e componenti. Sarebbe auspicabile poter disporre di certificati di garanzia dei prodotti edilizi, così come avviene per molti altri prodotti presenti sul mercato<sup>9</sup>. Tramite un certificato di garanzia, il progettista è facilitato a poter prevedere i cicli di manutenzione/sostituzione e informato per compiere delle scelte alternative di progetto. Alcune aziende si sono rese consapevoli della possibilità di fornire maggiori sicurezze agli utilizzatori dei sistemi offerti e messi sul mercato, garantendo le prestazioni dei propri sistemi per un periodo di tempo da loro stabilito (tramite prove o rilevamenti sul campo) rispetto alla data di installazione. Inoltre nel fornire un certificato di garanzia, assicurano il loro impegno nell'intervenire e valutare la natura e l'entità dell'intervento di ripristino, qualora se ne presenti la necessità, prolungando rapporti di assistenza con gli utenti o i gestori del patrimonio edilizio<sup>10</sup>.

Il certificato di garanzia è attualmente uno strumento facoltativo, allo stesso modo della Dichiarazione ambientale di prodotto (EBPD – *Environmental Product Declaration*)<sup>11</sup> secondo le raccomandazioni normative ISO 14020 - ISO 14025 – ISO 21930, che fornisce le informazioni di impatto ambientale dei prodotti da costruzione, utili per la valutazione del ciclo di vita. Entrambi si riferiscono comunque a prodotti che presentano la marcatura CE<sup>12</sup>, quindi conformi ai requisiti essenziali stabiliti dalle direttive comunitarie. Il concetto di durabilità correlato al marchio CE significa la stabilità delle caratteristiche dichiarate di un prodotto, in relazione a uno o più dei sei requisiti essenziali. Tale stabilità dipende dall'evoluzione nel tempo, o invecchiamento, di una o più prestazioni caratteristiche e implica la resistenza al deterioramento durante l'esposizione ad agenti esterni normalmente prevedibili o specifici.

Nella prassi esiste un approccio definito di "prevenzione" nelle fasi della progettazione e dell'esecuzione dei lavori. In tal caso esistono proprio degli organismi, che svolgono attività

9. Alcune aziende del settore delle costruzioni si stanno rendendo consapevoli della durata dei loro prodotti e assumendo la responsabilità di una loro durata garantita, con la consapevolezza che l'inserimento del prodotto in contesti con condizioni differenti, durante la fase d'uso, può far presupporre scenari di durata e obsolescenza o guasto differenti.

10. È d'esempio l'azienda Wierer del gruppo Monier SpA, Bolzano, che fornisce sistemi di copertura con tegole in cemento, che nella garanzia offre la propria competenza per il ripristino del sistema, in caso di necessità, a proprie spese (prodotto sostitutivo e mano d'opera), chiaramente assicurandosi la validità della garanzia esclusivamente secondo precisi requisiti di conformità del sistema tecnologico rispetto ai loro prodotti e a una installazione eseguita in conformità ai loro manuali e alle norme tecniche. In questo caso l'azienda fornisce due tempi di durata garantita, uno relativo al manto di copertura, quindi ad un elemento del subsistema, e un secondo relativo a tutto il subsistema della copertura.

11. Secondo la ISO 14025 (*Type III environmental declaration - EPD*), e nello specifico dei materiali e componenti edilizi secondo la ISO 21930 (2005) *Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products (EBPD)*. Tale dichiarazione è stabilita sulla base dell'Analisi del Ciclo di Vita LCA (*Life Cycle Assessment*) e in alcuni casi contempla anche la durata di vita degli elementi analizzati. Nonostante i molti approcci affrontati da diverse nazioni per regolamentare la Dichiarazione Ambientale, a livello europeo è stato armonizzato il metodo EPD sviluppato e gestito dal Consiglio di Gestione Ambientale svedese (*Swedish Environmental Management Council*).

12. Per certificare la conformità alla direttiva europea sui prodotti da costruzione CPD, un prodotto immesso sul mercato deve riportare il marchio CE. Il marchio CE indica che il prodotto è conforme alle specifiche tecniche applicabili (CEN, ETA). Inoltre, il produttore è obbligato a dichiarare le prestazioni del prodotto in merito alle caratteristiche richieste dalle specifiche tecniche (CEPMC 2005).

di controllo tecnico per evitare danni nella fase di vita dell'edificio e dei suoi componenti<sup>13</sup>. Tuttavia, oltre alle indicazioni sui possibili difetti e i suggerimenti pratici da effettuare, non vi sono indicazioni numeriche dei cicli annuali di manutenzione, per poter comprendere le possibili durate collegate a situazioni specifiche. Per esempio vengono indicate solo le cause di invecchiamento delle costruzioni (l'alterazione dei materiali, la patologia degli elementi tecnici, l'obsolescenza delle funzioni); per le murature di elementi in laterizio vengono schedati i tipi di opere, l'alterazione dei materiali, i metodi di manutenzione e rinnovo delle facciate in mattoni, ma non sono indicati i cicli di manutenzione.

In Germania, gli elementi da costruzione sono classificati dal punto di vita ambientale considerando il loro intero ciclo di vita, senza però indicare la durata di vita. In Gran Bretagna, l'*Approved Environmental profile* può essere indicato in modi diversi, relativamente agli aspetti di durabilità: uno di questi prevede l'indicazione degli anni di durata di vita dichiarata. Tuttavia la durata di vita dichiarata è di solito una durata esito di studi teorici convenzionalmente corrispondente a 60 anni e non corrisponde alla durata di vita reale degli elementi. È il caso infatti dei dati di durata di vita (accostati alle caratteristiche ambientali) di materiali convenzionali, come i laterizi e le murature in laterizio, riportati nella Green Guide pubblicata dal BRE: tutte le tipologie di muratura, secondo quelle indicazioni, durano almeno 60 anni o di più, ma un 'di più' indefinito. In Francia le dichiarazioni ambientali di prodotto sono raccolte nella banca dati INIES<sup>14</sup>, di riferimento per le caratteristiche ambientali e di igiene e salute dei prodotti da costruzione. La banca dati mette a disposizione gli EPD delle aziende manifatturiere o delle associazioni di categoria di produttori, secondo gli standard richiesti<sup>15</sup>.

13. È il caso di SOCOTEC in Francia, il cui approccio è ben dettagliato nella Guide Socotec de la maintenance et de la réhabilitation, (2006), tradotta e adeguata al contesto italiano da G. Paganin (2007): oltre all'analisi di problemi concreti, comparsi su numerose tipologie di edifici e costruzioni nelle fasi di progettazione e costruzione, vengono descritte e suggerite le soluzioni pratiche adottate per recuperare per tempo le possibili patologie. Le schede sono suddivise seguendo la classificazione delle edificio in subsistemi e classi di unità tecnologiche.

Approccio simile è consultabile in altri riferimenti in letteratura, in particolare nelle schede pratiche di Albano J.R. (2005), *La maintenance des bâtiments en 250 fiches pratiques*, tradotto in italiano da C. Talamo (2008), vi sono prescrizioni simili al riferimento precedente, ma sono indicate anche delle possibili durate e gli anni dei cicli di manutenzione.

14. Questa banca dati è stata costituita con un comitato tecnico composto da AFNOR (Association Française de Normalization), CSTB, il Ministero della Salute e affari sociali, il Ministero per l'ecologia e lo sviluppo sostenibile, il Ministero della Cultura, il Ministero dell'Industria e il Segretariato per l'Età del patrimonio edilizio.

15. Il lavoro pubblicato in INIES è assicurato dalla validazione di un comitato tecnico strategico, nominato dal Ministero francese per le abitazioni. I contenuti della banca dati sono rivolti ai professionisti del settore delle costruzioni (*Business to Business communication*), ma anche a un pubblico generico interessato (*Business to Consumer communication*). Molti EPD in INIES coprono già ora una vasta gamma di prodotti edilizi rappresentativi del mercato francese, con una stima di circa mille riferimenti commerciali.



Unità funzionale: 1m <sup>2</sup>	Peso totale UF (kg)	Energia non rinnovabile EE (MJ/UF/anni)	Emissioni dannose (kg/UF/anni)	Inquinamento dell'aria (m <sup>2</sup> /UF/anni)	Assottigliamento strato di ozono (kg ethyl./UF/anni)	Cambiamenti climatici (kg CO <sub>2</sub> /UF/anni)	Durata di vita (anni)
Pannello di legno Okumé	6	7,4	0,017	2,15	0,026	0,025	50
Monomur 30 cm laterizio	239	6,29	0,000007	30	6°-5	0,923	100
Blocco di cemento e EPS	180	5,94	0,001	50	7°-4	0,49	50
Blocchi di cemento	180	1,58	0,00012	16,7	6,6°-5	0,16	100
Pilastrini e travi lamellari	129	14,6	0,002	123	0,0021	-0,79	100
Controventi in pino lamellare	5,6	0,84	0,0052	16,4	0,0013	0,004	100

Tab. 1-1: Tabella con indicatori ambientali e i dati numerici di alcuni materiali da costruzione (Fonte: INIES, 2009).

Esistono diverse banche dati con i valori di riferimento per la durata di vita di materiali e componenti. Vi sono banche che indicano i valori solo per gli edifici e non per le sue parti, altre definiscono i valori di durata per componenti e materiali. Tali riferimenti sono principalmente di origine anglosassone o tedesca, non sempre facilmente conciliabili con altre realtà nazionali. Tuttavia sono un buon riferimento informativo. Le basi scientifiche delle banche dati sono di diversa origine.

La banca dati di *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE) dà informazioni sui materiali edilizi, è stata redatta in base ai dati statistici di durata di vita osservati in opera sul campo; è spesso un buon riferimento in letteratura per quanto riguarda le strutture. La già citata norma ISO 15686 suggerisce dati per le modalità di sostituzione e indica delle durate per le parti dell'edificio<sup>16</sup>.

In un articolo relativo a una ricerca svedese sull'energia consumata nelle fasi del ciclo di vita degli edifici (Adalberth, 1997), vengono messe a confronto le durate di vita di diversi prodotti edilizi<sup>17</sup>. In Svizzera l'Associazione Inquilini (MV) congiuntamente all'Associazione dei Proprietari Immobiliari (HEV Schweiz) hanno redatto una piccola banca dati con la dura-

16. - 150 anni di durata per le parti strutturali; - 100 anni per i componenti di difficile sostituzione; - 40 anni per i componenti di maggior sostituzione; - 25 anni per gli impianti; - 3-6 anni per i componenti di facile sostituzione.

17. Durate di vita (anni): vita dell'edificio: 50 - Pareti esterne, pareti interne, fondazioni, isolamento termico: 50 - Pavimento in legno: 50 - Pompa per l'acqua e cavi elettrici: 50 - Canalizzazioni di ventilazione: 50 - Rivestimento di facciata in legno: 30 - Serramenti: 30 - Arredi interni mobili: 30 - Manto di copertura e pluviali: 30 - Pavimentazione plastica: 17 - Bollitore dell'acqua: 16 - Pittura e tappezzeria: 10.

ta di vita di alcune parti dell'edificio, soggette a guasti periodici<sup>18</sup>. L'obiettivo è stato quello di mettere a disposizione un valido strumento, per gli inquilini e i locatori, di riferimento indicativo che proponga delle durate di vita precise di parti degli edifici. La tabella fornisce, indicativamente, le durate di vita media per componenti e impianti di media qualità, con un uso normale.

4. Involucro dell'edificio			6. Rivestimenti da pavimento		
<i>Isolazione dell'edificio, finestre, avvolgibili, lamelle, tetti, pensiline</i>			<b>Davanzali interni</b> , laccati, verniciatura ad olio, acrilica o resina sintetica		
<b>Isolazione compatta</b>			<b>Dispositivi di chiusura</b> automatici		
Polistirene (sagex)	25 anni		<b>Serrature</b>		
Pannelli isolanti in lana di vetro	30 anni		Porta principale		
<b>Isolazione ventilata delle facciate</b>			Porte interne		
Rivestimento in legno	30 anni		<b>Sigillature di giunti</b>		
Lastre	30 anni				
Rivestimento in eternit	40 anni				
<b>Intonaco</b>					
Intonaco minerale di facciata, su muratura	40 anni				
Intonaco sintetico di facciata, su muratura	25 anni		<b>Pavimenti</b>		
Vernice ai silicati, su intonaco di facciata (minerale)	25 anni		PVC, novilon, ecc.		
<b>Pittura a dispersione esterna</b> rivestimento minerale per sottofondi			Gomma, caucciù		
Isolazione tetto, solaio e cantina	20 anni		Linoleum		
<b>Davanzali di finestre</b> , adattati all'isolazione dello stabile			Sughero sigillato		
Sigillatura di giunti esterni elastici	10 anni		<b>Laminato (parquet sintetico)</b>		
<b>Finestre con doppio vetro</b> , telaio in legno			Qualità inferiore, classe 31		
Finestre con vetro isolante	25 anni		Qualità media, classe 32		
Materiale sintetico, legno, legno/metallo, isolazione termica e acustica			Qualità superiore, classe 33		
Materiale metallico, isolazione termica e acustica	25 anni		<b>Parquet</b>		
<b>Finitura di finestre e davanzali</b> , verniciatura a olio, acrilica o in resina sintetica			Parquet incollato, legno massiccio di piccolo formato, lamabile fino a 6 volte		
<b>Guarnizioni in gomma</b> per finestra			Parquet massiccio, listoni in legno duro lamabile fino a 4 volte		
<b>Avvolgibili</b>			Parquet multistrato, listoni in legno dolce		
Legno	25 anni		Parquet con impiallacciatura in vero legno o parquet lamellare (il supporto non è vero parquet), non lamabile		
Metallo, alluminio	30 anni		Sigillatura/oliatura parquet (trattamento)		
			<b>Supporti per rivestimenti da pavimento</b>		
			Pannelli in fibrolegno, in MDF o truciolare, strati applicati in forma liquida quali anidrite, ...		
			<b>Pavimenti tecnici</b>		

Fig. 1-10: Stralcio della tabella della durata di vita allestita dall'Associazione Svizzera Inquilini (MV) e dall'Associazione dei Proprietari Immobiliari (Fonte: HEV Schweiz, 2005)

Nel rapporto di ricerca francese di Michel Kornmann *Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie – Étude bibliographique des avis d'experts* è ampio l'approfondimento sulle banche dati presenti sul panorama europeo e extra europeo, per ognuna vengono indicati dati di riferimento e specifiche sulle modalità di redazione.

- Banca dati contemplata dalla norma americana ASTM E 2116;
- Banca dati americana con l'aspettativa di vita di componenti per edifici residenziali, in struttura lignea tipica, redatta della *National Association of Home Builders*, una federazione di più di 800 costruttori edili NAHB (2007, [http://www.nahb.org/fileUpload\\_details.aspx?contentID=72475](http://www.nahb.org/fileUpload_details.aspx?contentID=72475));
- Banca dati americana *Whitestone research* redatta dalla *Whitestone building maintenance*

18. È una piccola banca dati di regolamentazione senza alcuna garanzia assicurativa che contempla i seguenti elementi dell'edificio: Elementi e impianti per Riscaldamento/Ventilazione/Climatizzazione; Elementi e impianti per Produzione di acqua calda; Caminetti; Elementi per Involucro dell'edificio; Elementi per Soffitti/pareti/porte/serramenti; Elementi per Rivestimenti da pavimento; Elementi e impianti della Cucina; Elementi e impianti Bagno/doccia/WC; Elementi e impianti Ricezione radio e TV/Impianti elettrici; Balconi/tende da sole/giardino d'inverno/terrazze; Ampliamento cantine e solai; Ascensori; Impianti e attrezzature comuni.

- nance and repair cost reference*, con la stima dei costi di 50 anni di manutenzioni per edifici tipici americani nei settori commerciali e industriali ([www.whitestone.com](http://www.whitestone.com));
- Banche dati canadesi (CMHC et Ontario): una sulla durata di vita di materiali e componenti tecnici di edifici residenziali di media e grande dimensione, di cinque piani e oltre (CMHC), e la seconda dell'Ontario Housing Corp. *Building Element Life Expectancy Guidelines* (<https://www03.cmhc-schl.gc.ca>);
  - Banca dati inglese sui materiali da costruzione della *BuildingLifePlan* BLP, sponsorizzata dalla Housing Corporation, una agenzia del Governo britannico che finanzia le edificazioni a basso impatto ambientale, e realizzata con il supporto tecnico di *Building Performance group Ltd*, una compagnia assicurativa per i difetti nelle costruzioni. Questa banca dati si basa su alcune banche dati inglesi: la HAPM (1992) *Component life manual* (Spon) ([www.componentlife.com](http://www.componentlife.com)); la BPG (1999) *Building fabric component life manual* (Spon); -la BLP (2000) *Building services component life manual* (Blackwell Publ.). Offre dati per circa tremila soluzioni tecniche edilizie. È la banca dati su cui si basa il BRE per l'attività di valutazione della durabilità.
  - Banca dati inglese *Life Expectancy of Building Components* è una base commerciale per il *Building Cost Information Centre* BCIS (*Life expectancy of building components, Surveyors' experience of buildings in use, a practical guide*, BCIS (new edition, 2006)), e contiene circa 300 componenti.
  - Banca dati svizzera OFQC "Invecchiamento degli elementi da costruzione e costi di manutenzione, dati per la ristrutturazione di edifici residenziali", sviluppata dalla *Ecole polytechnique de Zurich ETH*<sup>19</sup>.
  - Dati dell'Istituto ecologico austriaco (*Österreichisches ökologie Institut*): in modo molto semplificato l'istituto dà indicazioni delle durate in relazione alle tecnologie costruttive: - costruzione leggera 50-60; - costruzione mista 80-90; - costruzione massiva 80-90
  - Banca dati francese contemplata nei certificati per il risparmio energetico: introducendo recentemente i certificati per il risparmio energetico, la Francia impone che i gestori energetici dispongano da parte dei loro clienti tali documenti, ai fini di certificare il risparmio energetico. Oltre a definire in modo standardizzato il risparmio di energia in valori specifici (kWh), è stato proposto anche di definire le durate di vita tipiche delle parti dell'edificio interessate. Vi sono alcune indicazioni sulle durate di vita nella regolamentazione dei certificati bianchi per le residenze.

Dunque valori di riferimento delle durate tipiche di componenti edilizi esistono, a queste non è possibile far corrispondere anni di durabilità provenienti da test di laboratorio o verifiche sul campo. I dati sono spesso indicati in intervalli di valori poiché si tende a prevedere un possibile comportamento differente in relazione al contesto e alle sue diverse declinazioni. Comparando le molte banche dati può emergere come per una stessa tipologia di componenti possano esistere durate diverse, in conseguenza alla cultura materiale e tecnologica locale e alla composizione e caratterizzazione materica dei prodotti. È difficile comprendere quali valori di riferimento adottare per il caso specifico, poiché spesso emergono valori di durata molto lontani o discordanti dal sapere comune tipico di un determinato contesto pro-

---

19. L'approccio tecnico di questa banca dati è originale e interessante. La durabilità di ogni elemento è descritta secondo la curva di invecchiamento, mostrando la variazione del valore residuo del servizio in funzione del tempo. La qualità del servizio e il valore di un componente diminuisce con il tempo

gettuale. È tuttavia importante fare il tentativo di stimare il comportamento nel tempo dei componenti e dei sistemi dell'organismo edilizio, pur passibile di errore o approssimazione, rispetto a tralasciarne l'importanza rispetto al ciclo di vita dell'edificio.

### 1.3. Contestualizzazione

Contestualizzare significa considerare una realtà, un problema rapportandolo al contesto fisico, ambientale, storico, sociale e economico nel quale è maturato e si è manifestato. Nell'affrontare il progetto e la realizzazione di una architettura, le scelte progettuali, legate al contesto ambientale, materiale, temporale, vanno oculatamente calibrate, poiché costituiscono e forgiano le caratteristiche di un edificio. È indispensabile contestualizzare il progetto per definirne la forma, che dipende dalla conformazione del territorio e dalle caratteristiche climatiche e ambientali. Dall'analisi del contesto, dalla considerazione del contesto temporale e della durata dell'edificio, dipende anche la scelta delle tecnologie e dei materiali e componenti per la costruzione dell'edificio. Un'architettura, se ben contestualizzata, risulterà unica e in equilibrio con l'ambiente costruito e quello naturale.

Il termine 'contestualizzazione', se associato alla procedura metodologica LCA per individuare gli impatti ambientali di un materiale, un componente, un sistema costruttivo e dell'edificio, significa valutazione e pesatura degli impatti ambientali attraverso dei metodi basati su indici ambientali, dopo l'analisi dei flussi, il computo delle quantità coinvolte, l'inventario di tutte le sostanze in ingresso e uscita e dopo la caratterizzazione. Avviene una pesatura delle quantità di impatto prodotte dall'oggetto, per categoria di danno. I valori degli effetti, cioè, vengono moltiplicati per i "fattori peso", che esprimono l'importanza relativa attribuita alle differenti tipologie di impatto, a seconda della criticità ambientale. È una fase di interpretazione dipendente dalla particolare sensibilità a determinati temi da privilegiare, dal contesto, dalla differente cultura, dal diverso approccio ai problemi ambientali.

Può sembrare difficile o soggettivo valutare secondo dei parametri e indicatori localizzati rispetto a un territorio, tuttavia è importante, nella fase progettuale, provare ad accorpare i diversi impatti relativi per capire in valore assoluto, con un unico valore adimensionale, l'eco-indicatore (un indice ambientale finale) quale sia la soluzione costruttiva migliore oppure capire quale sia la fase del ciclo di vita che genera il maggior impatto ambientale. È fondamentale comprendere come supportare la scelta più adeguata rispetto al caso specifico e al contesto di riferimento tramite un metodo di valutazione tarato e strutturato rispetto al contesto territoriale in cui si costruisce l'edificio. Solo alcuni Paesi di sono mossi in tal senso e a volte ci si trova costretti a utilizzare metodi di valutazione "estranei" al territorio in cui si progetta.

La fase di valutazione d'impatto, a differenza della fase di inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici, nonostante i notevoli sforzi per l'armonizzazione<sup>20</sup>. Inoltre la soggettività legata alla scelta dei metodi di valutazione d'impatto difficilmente consentirà di raggiungere un consenso internazionale.

---

20. Tentativo di rendere omogenee le metodologie utilizzate nei diversi paesi, per renderle anche confrontabili tra loro.

### 1.3.1. Verso un nuovo concetto di *genius loci*

Il rapporto esistente tra l'uomo e il luogo nel quale si trova ad intervenire da sempre ha costituito una questione delicata. Mediattrice del difficile dialogo tra i due è l'architettura, con l'arduo compito di interpretare e concretizzare il connubio tra le due entità. La relazione tra architettura, infrastrutture, spazi pubblici e anche la società umana e le esperienze culturali influenza lo sviluppo negli anni della città e contribuisce a creare un "senso del luogo", lo spirito o l'identità del luogo, il *genius loci*<sup>21</sup>.

Come rievoca Zarelli (1998) nell'antichità i sacerdoti greci, gli *àuguri* romani, o i druidi celti, erano determinanti nella scelta della fondazione di una città (cosa di per sé sacra, perché sacro era ritenuto l'abitare): individuavano il luogo idoneo per stabilire un nucleo urbano sulla base di conoscenze cosmologiche e divinatorie, oltre che geologiche e naturali. Lo spazio era considerato la modalità principale dell'essere nel mondo e si riteneva impossibile comprendere l'essenza dell'uomo indipendentemente dall'ambiente in cui viveva. L'*oikos* greco, il senso della dimora e della manifestazione dell'essere, poneva il "senso del limite" comunitario del vivere associato in assoluta simbiosi con le risorse naturali del luogo, quali la cultura materiale, quella spirituale e quella culturale. In tale contesto, il concetto stesso di economia si poneva in termini di sussistenza della comunità: una lettura involontariamente ecologica delle forme di civiltà.

Nella storia le società native nel mondo intero avevano tre caratteristiche in comune: possedevano un rapporto intimo e cosciente con il loro luogo; erano stabili culture "sostenibili", che spesso duravano migliaia d'anni; avevano una intensa vita cerimoniale e rituale. Il nostro modello di civilizzazione è in evidente opposizione con tutto ciò: vengono esaltati una razionalità strumentale e un tipo riduttivo di "praticità", disincantando ogni aspetto della cultura tipica.

Nel riprendere l'evoluzione della chiave interpretativa del *genius loci*, è doveroso rievocare i grandi contributi teorici di Christian Norberg Schulz (1979), che negli anni Settanta, affermava come il fare architettura significhi, prioritariamente, incontrare il *genius loci*, ovvero dare un'immagine al luogo che diventi espressione di una precisa essenza<sup>22</sup>.

La qualità del manufatto architettonico nel passato era il risultato di un lungo e complesso processo di sintesi ai fini di rendere possibile la costruzione. Un concentrato di attenzione verso i luoghi, di sapienza progettuale, di maestranze che, con sicurezza, traducevano le regole dell'arte ben strutturate e ripetitive, di patrimoni diffusi di conoscenze dei materiali locali e dei loro comportamenti (Lauria, 2008). Nell'architettura contemporanea, al contrario, molti edifici sono stati inseriti con estrema indifferenza nel territorio e nell'ambiente costruito, sfasando le proporzioni (fig. 1-11) e sorpassando qualsiasi tipo di identità locale, annullando il dialogo, da sempre esistito, tra tradizione conservativa e trasformazione, che anche oggi richiama senso di equilibrio e organicità. Spesso tale indifferenza contamina anche la verifica della compatibilità ambientale. Gli impatti ambientali, il gigantismo, l'anoni-

21. Il "senso del luogo" è il carattere o l'essenza una zona, che comprende tutte le caratteristiche, sia naturali che artificiali. La classicità suggerisce che i luoghi possono avere un'anima e diventare sede di un *genius loci*. I luoghi si guadagnano l'anima, attraverso un processo di deposito, di accumulazione di affetti, che viene operato dalle diverse generazioni di persone che li hanno abitati (Zarelli, 1998).

22. "il *genius loci* è quanto sopravvive alle continue modifiche degli assetti funzionali e conferisce un carattere indelebile a città e paesaggi, rendendo fenomeni architettonici differenti, nelle forme nel tempo, parti di una e riconoscibile esperienza" (Norberg-Schulz, 1979).

mato delle metropoli e l'insignificanza dei loro luoghi, le estranee forme razionaliste sono un derivato della perdita di quella sensibilità di misura e di armonia tra naturale e artificiale.



Fig. 1-11: Casi evocativi di superamento di ogni identità locale e rispetto per il luogo e le proporzioni: sono l'edificio del Casinò Campione d'Italia, arch. Mario Botta (Fonte: foto dell'autore) e edificio in Francia (Fonte: Ruggiero, 2009)

Quando Le Corbusier immaginava il futuro delle città, nei primi anni del XX secolo, anticipò una nuova estetica industriale che avrebbe liberato il progetto dagli ostacoli rappresentati dal mondo naturale. Secondo lui, la città era "un'operazione umana diretta contro la natura" e la casa era "una macchina per abitare". Immaginava un'architettura mondiale plasmata dallo "spirito della produzione di massa", l'ideale di "un unico edificio per tutte le nazioni e per tutti i climi". Alcuni suoi contemporanei, a ragion veduta, denigrarono tali idee futuristiche, criticando la breve durata che tale atteggiamento avrebbe avuto a favore di un disequilibrio ambientale. Per molti aspetti il nostro mondo ha rispecchiato il mondo di Le Corbusier: da Rangoon a Reykjavik la 'taglia unica' per tutti gli edifici applica un'estetica indifferenziata per dominare le regole del mondo naturale. Per quanto edificante potesse essere per lo spirito di Le Corbusier, è ormai sempre più evidente che gli edifici concepiti come macchine impoveriscono la diversità culturale e deprivano i suoi abitanti del benessere ambientale. Come sostiene Heidegger (1954) *"abitare non è primariamente occupare, ma l'avere cura e creare quello spazio nel quale qualcosa di individuale sorge e prospera"*.

Nella contemporaneità vi sono tentativi di riconsiderazione dello spirito del luogo e una revisione del rapporto con esso. Per cui nella progettazione architettonica, in cui si auspica a un approccio olistico, che oltrepassi le tendenze dello star system, della ripetizione e riproduzione, si tende verso la discontinuità e la non ripetizione, riconsiderando lo spirito proprio del luogo secondo una nuova chiave di lettura (non trascurando la geologia, l'ambiente, la flora e la fauna, la cultura, la società e la tecnologia). Progettare in sintonia con un luogo significa oggi progettare architetture in coerenza con tecnologie e durate adeguate alle funzioni richieste nel luogo o nel contesto. Per cui il rapporto con il luogo è oggi di diverso genere: il nuovo concetto di *genius loci*, in chiave di sostenibilità ambientale, si prefigura da "identità di un luogo" a "identità di tecnologie" e "identità di durate" per l'architettura e i luoghi. Per un rinnovato equilibrio con lo spirito del luogo, è necessaria un'architettura con tecnologie appropriate, non più solo con i luoghi, ma soprattutto con i tempi e le durate (Gangemi, 2004).

Così come le visioni futuristiche di Le Corbusier di nemmeno un secolo fa, oggi alcune avanguardie prefigurano un futuro in cui gli edifici saranno realizzati sul modello degli alberi, cioè organismi viventi che partecipano, in modo produttivo, al loro ambiente: edifici immersi nel paesaggio, che catturano l'energia del sole, sequestrano il biossido di carbonio e producono ossigeno; paludi e giardini botanici che recuperano i nutrienti dall'acqua di scarico che scorre nel terreno; tetti coperti di terra e *sedum* che assorbono l'acqua piovana, su cui nidificano gli uccelli. Un sistema che ritorna a sostenere la vita in armonia con i flussi dell'energia, con lo spirito umano e le altre cose viventi (McDonough, 2002), che tende a considerare gli edifici come organismi e non come macchine. Si tratta di teorie di sviluppo rigenerativo (Pedersen Zari, Jenkin, 2012), in cui si contempla il significativo beneficio quale esito positivo per la società umana e la cultura. Tale approccio rigenerativo è considerato con una influenza positiva su aspetti come l'identità culturale, il benessere ambientale e la salute psicologica. Poiché tale approccio contempla la progettazione partecipata rispetto al piccolo team di progettazione e di decisione dei processi, questa può contribuire al riconoscimento della indivisibilità degli aspetti ambientali, economici, sociale e culturali della progettazione architettonica.

Perciò, indagando il futuro, le prospettive relative agli edifici e alle città, ai territori urbanizzati e non, si nota l'affiorare di una nuova sensibilità per cui abitare un luogo può diventare una partecipazione attenta e piacevole. Ciò significa immergersi nella vita di un luogo prefigurare al vita dell'edificio, la sua funzione e le sue possibili evoluzioni nel tempo, la sua durata e le trasformazioni spaziali che può subire nel ciclo di vita, per scoprire le forme, i materiali, le tecnologie costruttive più adatti al luogo. La scelta di materiali e tecnologie non dipende solo dal luogo e dal reperimento dei materiali in loco, l'ampia scelta e la globalizzazione dei mercati consente di poter adottare innumerevoli materiali, tuttavia la scelta va calibrata rispetto allo spirito del luogo, ma soprattutto rispetto all'identità dell'edificio da progettare e delle durate di materiali e componenti, diversi e di vario genere, e della funzione prevista per l'edificio.

Convergere verso una nuova chiave di lettura del *genius loci*, per progettare gli edifici che dureranno diversi anni nel futuro, implica riferirsi all'ambiente che è cambiato e sta cambiando velocemente. Gli archetipi tipici di un luogo e di una cultura architettonica e materiale non potranno essere più gli stessi. Chi progetta oggi non può riferirsi ai dati del passato, deve considerare i dati del futuro, al limite del presente; soprattutto deve usare le simulazioni del clima futuro, altrimenti il rischio di sbagliare previsioni diventa ancora più alto, rispetto al rischio già esistente di errore tra la simulazione e il comportamento reale (Mercalli, 2011). Gli scenari stanno cambiando, il cambiamento climatico è da considerare in modo prioritario nel progettare gli interventi edilizi. L'architettura al tempo stesso vive il clima in due modi: lo determina con le sue emissioni, ma ne viene condizionata dagli scenari futuri. Le previsioni, confermate ormai, da alcuni episodi ricorrenti, fotografano estati sempre più calde, per cui è necessario progettare le case in un modo completamente diverso, non solo le case, progettare le città, progettare un'urbanistica dove si possa sopravvivere degnamente in condizioni a cui non eravamo assolutamente abituati. Per esempio, si è sempre pensato, con coerenza, che in Pianura Padana, in zona prealpina, ci si dovesse solo difendere dal freddo invernale (il freddo invernale c'è sempre, per un periodo un po' più breve del passato), ma ormai il progetto dell'edificio deve prevedere la difesa dal caldo estivo, quindi occuparsi di aspetti fino ad ora spesso trascurati.

Se si osservano le simulazioni del Centro Euro-mediterraneo per i cambiamenti climatici, struttura di eccellenza italiana, fatta da un Consorzio di Università e CNR, e si analizzano le cartine geografiche relative alla simulazione per le estati di fine XXI secolo (quelle delle generazioni prossime future e di quelle che ora frequentano la scuola primaria) emerge una temperatura media estiva di 5-6° C in più, simile a quella del 2003, quale situazione per un'estate standard. Ciò implicherà fare un'agricoltura diversa, consumare acqua in modo completamente diverso, disporre di case resilienti, disporre di cisterne per la raccolta dell'acqua piovana, poiché il clima diventerà più simile a quello attuale della costa Africana. Per cui una casa di domani non potrà soltanto usare la stessa quantità di energia, ma farla con il sole, con il vento e con l'acqua. Sarà necessario usare il 5% dell'energia (10 kWh/mq.) che usava una casa normale (200 kWh/mq.) (attualmente casa passiva già lo fa). Esistono già molte opportunità di resilienza, solo in parte o in misura ridotta in messe in atto, che consentirebbero l'autosufficienza dalle fonti non rinnovabili.

Le nuove prospettive non devono essere divulgate e colte solo come una opportunità dell'utente finale di ridurre al spesa economica sul risparmio energetico. Tali prospettive, se gestite non solo con efficienza e per l'efficienza, ma con intelligenza, possono prospettare nuovi guadagni, occupazione in un momento di grande crisi economia. Sono coinvolte la grande industria che produce i materiali, gli installatori, gli artigiani, l'idraulico, il carpentiere, c'è chi fa gli infissi, chi il cappotto, etc. È coinvolto il professionista che progetta pedissequamente tramite simulazioni, e non improvvisa, un intervento architettonico, al fine di evitare successivi malfunzionamenti, degradi prematuri, ponti termici, etc. Al di là di delocalizzare l'acquisto di materiali in nuovi paesi emergenti, problema comunque non irrilevante se si pensa agli impatti ambientali, molti soggetti coinvolti non possono essere de localizzati, piuttosto vanno diversamente istruiti e aggiornati.

L'architetto oggi deve immaginare la vita del suo edificio nel tempo, per 30, 50, 100, 200 anni. Deve progettare oltre, deve essere contribuente e fautore del grande progetto di resilienza della civiltà. Deve pensare al clima diverso fra 50, 100, 200 anni. Deve pensare ad architetture il più possibile autonome, produttrici di maggior energia rispetto al loro consumo, a basso impatto ambientale, con un ciclo di vita dei materiali chiuso o attento al riuso, al riciclo a fine vita; deve pensare a cellule di sopravvivenza per gli utenti, in cui disporre di verde e poter autoprodurre cibo,. Va progettato un rinascimento del dialogo con il territorio, al fine di assicurare l'archetipico e primario bisogno dell'umanità, quale il sostentamento alimentare e il riparo, ovvero l'architettura, al di là di qualsiasi altro bene aggiuntivo. L'architettura ha quindi un ruolo pari a più del 50% nel progetto di resilienza (Mercalli, 2011).

### **1.3.2. *Gli impatti ambientali nel ciclo di vita dell'edificio***

Il concetto di qualità ambientale, all'interno del più ampio obiettivo di qualità dell'ambiente costruito, di qualità di progetto e di processo edilizio, è suscettibile di diverse interpretazioni, a diverse scale: da una lato si riferisce al sistema tecnologico dell'edificio e va intesa come ricerca di ottimizzazione dei "rapporti fisici, materici, energetici tra la costruzione e l'ambiente circostante" (Facondi, Piardi, 1998); dall'altro si riferisce al sistema "edificio", come ricerca di qualità legata alla dimensione spaziale e come relazione fra spazio e modificabilità dello spazio (Guazzo, Cocchioni, 1984). La qualità ambientale dell'edificio, nell'ambito della valutazione degli impatti, non deriva dalla sommatoria di componenti e di materiali, ma dall'integrazione e interrelazione di questi in un sistema organico unitario, quale è l'or-



ganismo edilizio (Cangelli, Paoletta, 2001). L'edificio provoca effetti sull'ambiente non solo nella fase di realizzazione, ma durante tutto il processo edilizio: sono da valutare gli impatti generati dalla produzione, dalla fase d'uso, fino agli impatti determinati dalla dismissione dell'edificio e dal fine vita dei materiali.

Negli ultimi duecento anni il nostro pianeta ha subito modificazioni molto rilevanti ad opera dell'uomo: verso la fine degli anni Ottanta, per la prima volta nella storia dell'umanità, la richiesta di risorse naturali ha superato le capacità di rigenerazione della Terra, determinando uno squilibrio che impedisce alla biosfera di rigenerarsi allo stesso ritmo con il quale viene consumata.

Tale percentuale di "consumo" è andata aumentando fino a superare, nel 1999, il valore del 120%: in termini concreti per far rinascere ciò che gli esseri umani consumano in un anno non bastano più dodici mesi, ma ne occorrono quindici circa (Di Giorgio, 2002). In questo contesto, dal punto di vista dell'architettura e dell'ambiente costruito, sostenibilità, o sviluppo durevole (per citare la locuzione francese per indicare questo stesso concetto) significa porre grande attenzione alle risorse fisiche, ambientali, energetiche e tecnologiche del nostro pianeta e alle questioni relative alla salute e all'efficienza dei processi costruttivi in modo che questi provochino il minor impatto possibile sull'ambiente e sui singoli individui.

L'impatto ambientale è definibile come l'insieme di tutti gli effetti, positivi e negativi, diretti ed indiretti, temporanei e permanenti, che ciascuna azione umana genera sull'ambiente, quale sistema complesso delle risorse umane e naturali. La consapevolezza che ciascuna attività antropica comporti una alterazione del fragile equilibrio del pianeta ad un livello molto complesso ha indotto a spostare l'analisi dei rischi dovuti allo sviluppo tecnologico su una base molto più ampia rispetto alle sole valutazioni economiche. La produzione di energia necessaria a soddisfare le esigenze in aumento, i processi di urbanizzazione che interessano quote di popolazione sempre maggiori, lo sviluppo dell'agricoltura indispensabile a soddisfare le crescenti esigenze alimentari, uno standard di vita sempre più elevato e molti altri fattori collegati alla crescita demografica e allo sviluppo tecnologico concorrono ad originare gravi problemi ambientali del nostro pianeta.

Tra i principali tipi di impatto ricordiamo l'inquinamento dell'aria, dovuto principalmente ai processi di combustione utilizzati per la produzione di energia; l'inquinamento chimico e biologico delle acque, causato in massima parte dagli scarichi urbani, industriali, agricoli e zootecnici; l'inquinamento da rumore, particolarmente importante nei centri urbani ed in prossimità di aeroporti e vie di comunicazione; gli effetti sul paesaggio e sull'assetto del territorio dovuti alla realizzazione di grandi impianti industriali ed energetici, alla costruzione di infrastrutture quali porti, aeroporti, ferrovie ed autostrade; gli effetti sanitari ed ambientali, dovuti ad incidenti che possono verificarsi in impianti a rischio rilevante, quali centrali nucleari, impianti idroelettrici, impianti chimici. Tali effetti ambientali hanno una caratteristica comune: il poter essere quantificati. Ciò rende possibile l'uso di metodi scientifici per poterne valutare l'entità.

Esistono numerosi tipi di impatto, gli effetti globali (effetto serra, piogge acide) e gli effetti sugli equilibri degli ecosistemi, che sono solo parzialmente quantificabili e che pertanto vanno analizzati con approcci empirici, conservativi, semiquantitativi o, a seconda dei casi, semplicemente dettati da esigenze di accettabilità pubblica.

Il puro metodo scientifico non è sufficiente a dare una completa risposta ai numerosi problemi ambientali generati dalla progettazione di manufatti, tuttavia sono in atto tentativi di ottimizzazione della valutazione degli impatti ambientali, il cui principale obiettivo è inda-

gare la compatibilità tra un dato progetto e l'ambiente. Alcuni accorgimenti si devono porre a più livelli nel settore edilizio, per prevedere (e non solo constatare) tutte le possibili cause di impatto ambientale: a livello progettuale analizzando diverse alternative di materiali ed elementi tecnici, per ottenere la soluzione idonea, con la migliore prestazione e minimi consumi; a livello dell'industria manifatturiera per controllare la qualità il processo produttivo e ridurre scarti e emissioni sull'ambiente durante la filiera delle lavorazioni; nella fase di realizzazione di un manufatto, con un miglioramento dei tempi e dei processi di cantiere; nella fase operativa e gestionale del manufatto, con un'ottimizzazione dei consumi (temici, elettrici) per la climatizzazione, l'illuminazione, gli elettrodomestici.

È dimostrato come la somma dei consumi energetici (produzione e gestione), attribuibili agli edifici, costituisca circa la metà dei consumi nazionali in termini di energia primaria; e le emissioni di anidride carbonica nell'aria, generate dalla combustione, presentano la stessa incidenza. Una normale unità abitativa media richiede per la sua costruzione circa 100 ton. di materiali per la maggior parte realizzati con processi di cottura, con un costo energetico medio di 500/700 kCal/kg. Quindi il costo energetico dei materiali impiegati in una abitazione ammonta a circa sulle 5 ton. di petrolio, a cui si aggiungono 0,5 ton. di petrolio relative ai costi energetici per le movimentazioni di terra, del trasporto degli inerti, e tutte le operazioni di cantiere. Quasi 20 milioni di abitazioni italiane (su un totale di 26 milioni) sono riscaldate nella stagione invernale. Il consumo medio per la climatizzazione invernale di una unità abitativa (con una variabilità locale legata alle condizioni climatiche) è di una ton. di petrolio (Aa.Vv., 2004). Si deduce, quindi, come i costi ambientali per la realizzazione di un'abitazione media siano praticamente simili a quelli consumati in pochi anni di vita per il suo riscaldamento. Affinché il trend di crescita del settore si orienti verso una operatività attenta alla questione ambientale, la progettazione, fin dalle prime fasi, può contribuire attivamente al controllo degli impatti attraverso valutazioni sulle soluzioni tecniche e i materiali adottati. La conoscenza delle prestazioni dei diversi materiali e dei componenti tecnici, indispensabili per pensare un edificio fin dalle prime fasi di progetto come un oggetto dotato di forma, colore, consistenza, peso, odore si completano con le cognizioni relative all'impatto degli stessi materiali e componenti tecnici sull'ambiente naturale e sull'uomo, nelle loro fasi di produzione, impiego e dismissione a conclusione del ciclo di vita (Manfron, 2006).

*Gli impatti in fase di produzione* - I materiali e i componenti da costruzione sono il risultato della trasformazione di materia prima, attraverso l'impiego di energia. Dalla materia grezza, alle semilavorazioni, al prodotto finito, per giungere al prodotto di scarto a fine della sua funzione, ogni fase intermedia necessaria per la lavorazione della materia richiede energia che, si accumula nel prodotto (come quantità di energia incorporata) o si sprigiona nell'ambiente sotto forma di calore. Nel percorrere la varie sottofasi dei processi di produzione di un materiale edilizio, si apprende come tutti i livelli contribuiscano agli impatti sull'ambiente. Nel reperimento delle materie prime si vanno a erodere enormi quantità di materiali da cave, miniere, deturpando il paesaggio, oltre a consumare materiali non rinnovabili. Inoltre è impensabile prevedere l'utilizzo futuro di sole fonti rinnovabili, poiché anche queste, oltre a non essere inesauribili, hanno effetti sul territorio: per costruire in legno, servono coltivazioni estese di alberi per approvvigionarsi di materia prima, come il già citato caso dei Paesi Bassi. Risulta un'altra volta evidente l'importanza di calare le scelte nel contesto del progetto e valutare lo sfruttamento delle materie prime, siano esse esauribili o inesauribili.

Gli impatti relativi ai trasporti non sono da sottovalutare. Purtroppo oggi, con la globalizzazione dei mercati e l'evoluzione della tecnologia delle costruzioni, non si può più pensare al reperimento locale dei materiali. Soprattutto, data l'eterogeneità dei prodotti presenti sul mercato, non è più controllabile facilmente la provenienza degli stessi, per cui le movimentazioni che un prodotto compie nella prime fasi della sua vita, fino al conferimento al cantiere a cui è destinato, provocano impatti notevoli sull'ambiente.

La fase manifatturiera vera e propria genera, per i consumi di energie e emissioni di materia di scarto e di sostanze nocive, il maggior inquinamento della filiera, oltre che dell'intero ciclo di vita di un edificio. Sta entrando a passo lento la volontà da parte delle aziende di ridurre le risorse e le energie impiegate (per la maggior parte perse durante i processi sotto forma di calore), grazie anche a azioni coordinate da associazioni di categoria, nonché dalle normative nazionali; permane tuttavia una certa difficoltà nella gestione dei rifiuti da scarti di lavorazione o dai processi industriali.

*Gli impatti in fase d'uso* - Appare chiara l'urgenza di intervenire sui consumi di gestione (riscaldamento, condizionamento, illuminazione, ventilazione, consumi degli elettrodomestici, ecc.) con maggiore attenzione rispetto all'efficienza dei processi di produzione e degli impatti sull'ambiente.

Le emissioni di anidride carbonica, responsabili dei cambiamenti climatici, sono proporzionali ai consumi primari di energia, con pesi diversi a seconda del vettore energetico primario (metano, GPL, benzina, gasolio, olio combustibile, carbone). Bisogna analizzare il consumo di energia primaria, per la valutazione degli impatti ambientali del sistema energetico nazionale. Le forme di inquinamento legate ai consumi di energia locali, dovute all'emissione di sostanze tossiche come gli incombusti come il monossido di carbonio (CO), come gli ossidi di azoto (NOx), come le polveri e specificamente il particolato (PM<sub>10</sub>) sono pericolose per la salute umana, localmente e a tempi brevi, non hanno praticamente effetto sul clima globale.

Tuttavia le sostanze inquinanti vengono generate in punti concentrati, quali i poli industriali e le aree urbane. Intorno ad ogni grande città esiste una nuvola contenente gas inquinati e polveri, disturbi acustici e luminosi, con fenomeni locali incidenti sulla salute. La distribuzione capillare delle sorgenti d'inquinamento rende difficile un approccio sistemico per il loro governo. Bisogna pensare che poi da questi poli, l'inquinamento si diffonde sull'intero pianeta.

Opere che potrebbero contribuire notevolmente sono il risanamento degli involucri esistenti, una progettazione più adeguata degli involucri in nuove edificazioni; una regolazione del condizionamento estivo; l'introduzione di sistemi di gestione automatizzata e un uso, ove possibile, delle energie rinnovabili. Il risanamento degli involucri permette la riduzione dei consumi per il riscaldamento ed è condizione vincolante per l'installazione del condizionamento estivo.

*La fase post-consumo* - Alla fine della vita utile di parti o di tutto l'edificio ci si trova di fronte a enormi volumi di rifiuti, se si considera l'elevato quantitativo di materiali edili impiegati ogni anno.

A causa della varietà di sostanze contenute nei prodotti da costruzione le operazioni di smaltimento non sono sempre facilmente pianificabili: sono sempre maggiori le sostanze altamente nocive per l'ambiente e la salute umana, per cui non basta uno smaltimento in discarica, ma si deve ricorrere alla raccolta dei rifiuti speciali. E inoltre, pur pianificando

la demolizione e lo smaltimento, fin dalla fase progettuale, è troppo lungo il tempo tra la fase di produzione e la dismissione. Quindi, è auspicabile optare per azioni di prevenzione, ovvero progettare gli edifici con modalità costruttive reversibili, che facilitino lo smontaggio e la demolizione selettiva delle parti, consentendo ove possibile, operazioni di riciclo dei materiali. E' necessario introdurre fra i paradigmi progettuali il *Design for Disassembling* (DfD), cercando di prevedere, nella progettazione di un manufatto, lo scenario alla fine della sua vita utile: anche tale principio influisce nella scelta delle tecnologie costruttive e dei materiali e componenti, di cui bisogna conoscere la durabilità. Poter prevedere il trattamento di un materiale o componente alla fine del suo servizio può implicare il miglioramento del processo realizzativo e l'orientamento delle scelte costruttive verso precise tecnologie.

Un materiale può essere realizzato con impatti ridotti nella filiera produttiva, ma, se il destino è la discarica, il vantaggio iniziale, in un bilancio del ciclo di vita, viene compromesso. Prevedere oggi un fine vita in atto solo tra qualche anno assume un carattere solo previsionale: ora si conoscono i mezzi e processi di trattamento nella prassi attuale, ma lo scenario futuro, attraverso innovazione tecnologica e conoscenze più approfondite della temporalità di nuovi materiali, potrà essere completamente diverso.

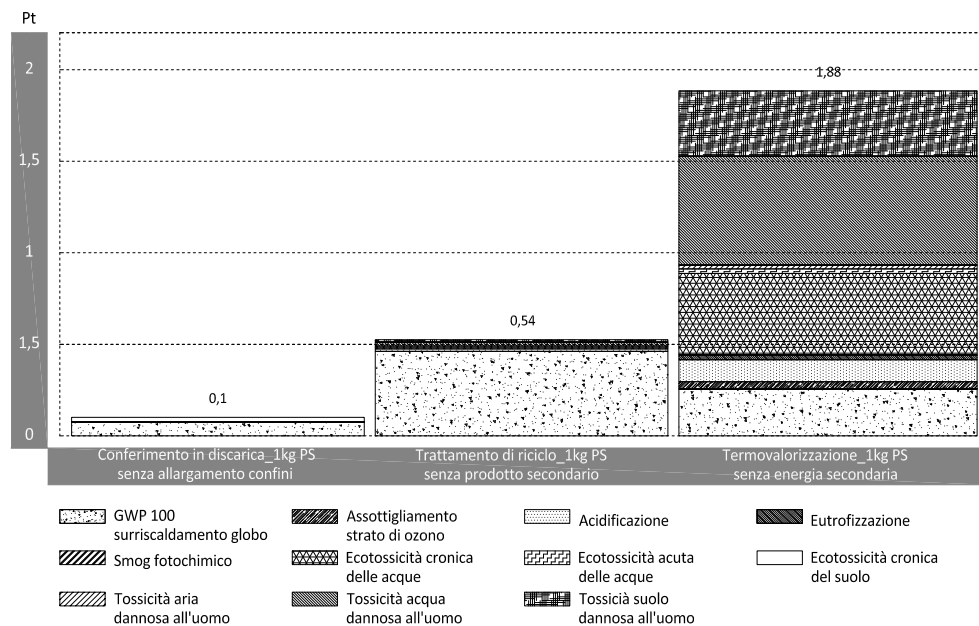


Fig. 1-12: Grafico di confronto tra gli impatti ambientali provocati dei processi di fine vita, senza considerare la generazione di prodotti e energie secondari con il riciclo e la termovalorizzazione: tutto l'impianto di riciclo per effettuare il trattamento di un materiale necessita di macchinari, grandi quantità di energie per funzionare e provoca emissioni in atmosfera (elaborazione tramite il software SimaPro).

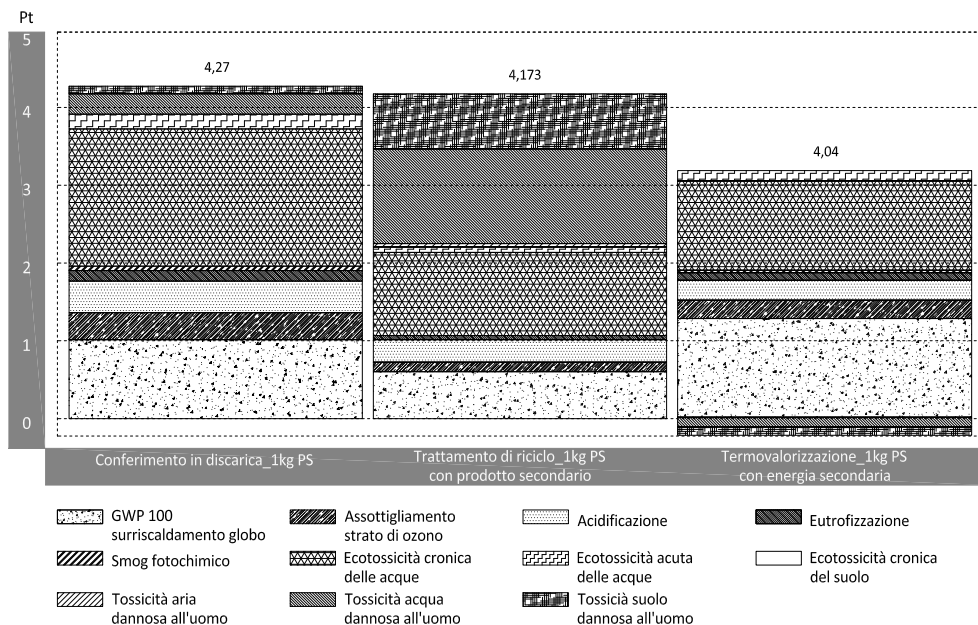


Fig. 1-13: Valutazione del confronto fra discarica e riciclo e termovalorizzazione con Edip96, quali trattamenti a fine vita di un kg di polistirene: la discarica presenta un maggior impatto ambientale rispetto agli altri due processi di trattamento a fine vita, che considerano il vantaggio di ottenere un prodotto secondario dal processo di trasformazione della materia (elaborazione tramite il software SimaPro).

Il processo di fine vita è identificabile con alcune operazioni sequenziali: alla dismissione e demolizione/disassemblaggio seguono le fasi di raccolta degli scarti e di trasporto ai centri di trattamento. Queste operazioni possono costituire le ultime attività del primo ciclo di vita di un materiale o componente. Successivamente seguono le fasi di trattamento dei rifiuti, quali il riuso o riciclaggio, la termovalorizzazione o la discarica controllata (con produzione di percolati e biogas). A seconda del tipo di trattamento si possono ottenere materia e/o energia per un nuovo impiego. Si passa quindi da un primo a un secondo ciclo di processi di lavorazione.

I processi di trattamento a fine vita consistono in normali processi di trasformazione della materia, quindi con i relativi carichi ambientali di inquinamento, oltre che di occupazione del suolo. Infatti, in quest'ottica, la discarica, quale processo di fine vita di un materiale (se si valutassero i soli processi manifatturieri di trattamento dei rifiuti), può presentare un profilo a basso impatto ambientale, poiché non necessita di energie e impianti per funzionare; ma il lato negativo è che, oltre a occupare grandi quantità di suolo e a deturpare i profili naturali di molti paesaggi, non genera alcun prodotto secondario. In alternativa, emerge la convenienza di un trattamento degli scarti, se si considera che nel caso del riciclo si ottengono dei prodotti secondari e nel caso dell'incenerimento delle energie (elettrica e termica), ammissibili in rete.

### **1.3.3. La contestualizzazione temporale e la durata dell'edificio**

Appare ormai chiaro come l'introduzione parametro 'tempo' nell'operatività del progetto di architettura sia irrinunciabile. Molti tra gli attori coinvolti nel processo edilizio affermano che edifici durevoli sono anche edifici sostenibili (Lauria, 2008), e il fatto di renderli durevoli dipende dalla qualità del progetto. Oggi, più che nel passato, la durata è uno degli elementi di base della concezione del progetto (la sua vita probabile, le sue alterazioni nel corso degli anni, il destino delle sue parti al momento della dismissione). Tuttavia il progetto contemporaneo ha la responsabilità ricostruire un dialogo tra il carattere permanente di un contesto urbanizzato (per la maggior parte storico) con il carattere temporaneo dei nuovi spazi progettati. Per temporaneità, più che un utilizzo breve nel tempo, si intende la possibilità di ridefinizione, di ri-costruzione, di capacità di adattamento. Una delle strategie potenzialmente più fruttuose nel settore edilizio, anche se lentamente praticata, è quella di incrementare la funzionalità dell'edificio, non solo massimizzando la sua efficienza nel ciclo di vita, ma soprattutto accrescendo l'intensità del suo uso, cioè allungando la sua vita utile e creando le condizioni affinché il suo tasso di utilizzo sia massimo, sia nel caso di edificio permanente (potenziando la manutenzione programmata per assicurare un allungamento della vita utile), sia nel caso di edificio temporaneo (potenziando la facilità di reversibilità e di ricostruzione della stessa struttura). Ogni edificio al termine della sua vita pone problemi di smaltimento, di eliminazione dei residui, talvolta di riutilizzazione delle parti. E quanto più breve è la vita di un oggetto, tanto più si apre un problema di materiali che diventano rifiuto. Pensare di accorciare la vita utile di un edificio, o pensare di operare su di esso dei cambiamenti, significa aprire un problema di gestione delle sue macerie, o progettare in modo che queste macerie siano poche, o ancora che siano composte da parti integre o omogenee, in modo da poter essere riutilizzate o riciclate al meglio (Mandron, 2006). Prolungare la vita utile dell'edificio e delle sue parti, insieme alla prassi del riuso e della riciclabilità di materiali e componenti, rappresenta una valida strategia per ridurre il consumo di risorse e energie (Rizzi, 2002). La ricerca scientifica consente attualmente migliori previsioni e controlli delle prestazioni fisiche degli edifici, compresi materiali e componenti. Tuttavia con grande frequenza, i cicli di vita edilizi dipendono da regole socio-economiche e non solo da quelle fisiche: la vita economica e funzionale è tipicamente più breve di quella fisica, infatti i rapidi cambiamenti sociali e economici anticipano il decadimento fisico. L'impossibilità quindi di prevedere tali cambiamenti rende la durata di vita degli edifici sempre più variabile e, a discapito dei principi ambientali, i cicli di ristrutturazione e sostituzione diventano sempre più frequenti. Come già evidenziato (§ introduzione e par. 1.1.2.) l'edificio è un organismo costituito da sottosistemi e componenti che invecchiano in modo differente e richiede costanti e consistenti interventi manutentivi al fine di conservare nel tempo le prestazioni attese e prolungarne la vita utile. Ragionando sui concetti di permanenza rispetto a quelli di temporaneità di un edificio, dal punto di vista del *Life Cycle Thinking*, si prefigurano alcune importanti strategie progettuali:

- nel caso dell'edificio fatto per durare, "permanente", si deve porre più attenzione alla fase operativa (fabbisogno energetico per la climatizzazione, consumi per la manutenzione) con la necessità di maggior isolamento termico e acustico, più massa termica, di più materiali, con la conseguenza di maggiori impatti ambientali causati dai processi produttivi dei nuovi materiali aggiuntivi; secondaria è la considerazione dei materiali e delle tecnologie da scegliere per l'involucro e il loro impatto ambientale.

- nel caso del “temporaneo” il ruolo degli impatti dei componenti edilizi è prioritario, considerando che in alcune situazioni di brevissimo uso la climatizzazione e gli impianti non sono nemmeno richiesti; un tal caso nella fase progettuale è molto più importante definire la vita utile, tipicamente non programmata, non nota e indefinita. In questo caso vi sono due strategie: se si scelgono materiali e componenti con un profilo ambientale della loro produzione molto impattante, molta energia incorporata ma una buona durabilità, è pensabile che il loro impatto possa essere assorbito in 40, 50, 60 anni di vita dell’edificio. Una seconda strategia prevede di scegliere materiali che abbiano, in un caso, un basso contenuto energetico, se la durata prevista è molto breve e l’uso davvero limitato nel tempo, oppure una buona durabilità, anche a discapito di un consistente impatto ambientale iniziale, al fine di poter essere riutati o riciclati: in questo caso gli impatti complessivi si suddividono in più cicli di montaggio e ricostruzione.

La disponibilità di dati attendibili sulla durata e sul comportamento nel tempo degli edifici e dei componenti edilizi costituisce uno dei problemi più rilevanti. Nell’ambito della sicurezza strutturale, viene indicata una vita nominale da considerare in fase di progetto di 10 anni per le strutture temporanee, di 10-30 anni per le parti strutturali sostituibili, di 15-30 anni per le strutture agricole e similari, di 50 anni per le strutture degli edifici e di altre strutture comuni, di 100 anni per le strutture degli edifici monumentali, per i ponti e altre strutture di ingegneria civile (UNI EN 1990:2006). Dagli studi di stima della vita utile degli edifici residenziali, emerge la difficoltà di disporre di riferimenti precisi. Un edificio residenziale presenta una durata di vita maggiore rispetto agli edifici industriali e commerciali, più facili all’obsolescenza. Prevedere quest’ultima, alla scala dell’edificio, risulta più difficile rispetto allo stabilire la durabilità tecnica di alcune sue parti.

Alcuni individuano diverse durate di vita degli edifici e stimano l’età media in correlazione alla frequenza dei cicli di ricostruzione. Altri evidenziano come, in correlazione con il contesto di riferimento, le durate di vita degli edifici siano molto variabili e dipendano da fattori specifici, quali il clima, le consuetudini costruttive, l’andamento del mercato immobiliare.

Nei Paesi in cui la durata di vita media e la durata di vita reale sono elevate (in Europa centro-meridionale superiori a 100 anni), le tecnologie costruttive di riferimento sono di tipo massivo. Nei Paesi nord-europei, dove il riferimento costruttivo sono le tecnologie leggere, la durata dell’edificio è generalmente più contenuta e soggetta a oscillazioni (tra 36 e 90 anni). Si può comunque rilevare come in letteratura siano indicati valori di riferimento della durata di vita reale da assumere in una analisi LCA generalmente superiori a 60 anni e pari al doppio degli anni di vita media.

Alla scala edilizia, una ricerca inglese sviluppata presso il *Centre for Whole Life Performance* del BRE (*British Research Establishment*) diagnostica le possibili cause dell’obsolescenza degli edifici e dei cambiamenti. I cambiamenti rapidi operati sugli edifici nell’arco della vita utile sono generati dalle innovazioni tecnologiche (quindi da nuovi requisiti), dalle tendenze e dagli stili di vita. Le strutture dell’industria delle costruzioni cambiano con lo sviluppo di nuovi prodotti e il progresso grazie all’innovazione e alle invenzioni. Le esigenze di rapide modificazioni sono motivate dall’incremento del benessere economico: di conseguenza lo stile di vita sociale richiede migliori qualità e standard negli edifici, maggior comfort, spazio e facilità di manutenzione. Ciò significa un aumento frequente delle modifiche negli edifici esistenti o spesso la costruzione di nuovi manufatti. Nella tabella seguente, stralcio della ricerca inglese, sono enumerati i tipi di obsolescenza e le possibili cause.

<i>Obsolescenza</i>	<i>Causa</i>	<i>Esempio</i>
<i>Da degrado fisico</i>	Degrado strutturale dell'edificio, dei materiali e componenti, degli impianti,...	L'edificio diventa pericolante, le pareti e i pavimenti cedono. Le strade o i ponti diventano impraticabili.
<i>Operativo</i>	Innovazioni nella scienza e nuovi esiti dell'ingegneria da applicare a edifici poco flessibili e adattabili	Edifici per uffici inadatti ad adeguarsi alle nuove tecnologie informatiche e della comunicazione
<i>Da esigenze del mercato</i>	La funzione originaria di un edificio non è più richiesta	Azienda cotoniera o di altro genere produttiva convertita in centri commerciali. Chiese sconsacrate convertite in alloggi
<i>Economica</i>	I costi possono essere rivalutati con miglioramenti	Il prezzo del sito è valutato di più del valore delle attività condotte su di esso
<i>Sociale</i>	I cambiamenti nelle necessità della società rendono alcuni edifici poco utilizzabili e funzionali	Edifici multipiano con appartamenti inadatti per l'alloggio di nuove forme di nuclei familiari.
<i>Etica</i>	Inadattabilità all'adeguamento per il superamento delle barriere architettoniche per i disabili	Gli edifici devono essere ristrutturati per l'accesso ai disabili. Spesso vengono abbandonati vuoti o ricostruiti se i costi dell'adeguamento sono troppo elevati.
<i>Legale</i>	La legge proibisce l'uso di edifici se non modificati rispetto a precisi vincoli legislativi obbligatori	Materiali contenenti amianto. Regolamentazioni antincendio
<i>Da regolamentazioni</i>	Principi di sostenibilità delle costruzioni e vincoli dalla Sovrintendenza ai beni culturali	Edifici a basso consumo energetico; richiesta dell'utenza di edifici sostenibili; edifici vincolati dalla sovrintendenza per preservare la loro demolizione o alterazione.
<i>Estetica</i>	Lo stile architettonico non è più di tendenza	L'architettura (esterna e interna) degli edifici per uffici degli anni Sessanta - Settanta

Tab. 1-2: Tipologie di obsolescenza degli edifici (Fonte: elaborazione dell'autore da Rizzi, 2002).

Sulla nozione di durabilità e sulle sue possibili accezioni l'Unione Europea sta lavorando da prima del 1999, anno di pubblicazione di una Guida sulla "Durabilità e la Direttiva dei prodotti da Costruzione", ai fini di una armonizzazione delle diverse norme europee (EOTA o CEN). La Direttiva Europea sui Prodotti da Costruzione, base per la marcatura CE, definisce sei esigenze essenziali da applicare agli edifici e che devono essere mantenute tali per una durata di vita economicamente ragionevole (CEE 1989). Tra queste ci si riconduce alla durabilità del prodotto, definita dalla norma UNI EN 13306 come "Attitudine di un'entità ad eseguire una funzione richiesta in determinate condizioni d'uso e di manutenzione, fino a quando non si è raggiunto uno stato limite, che può essere caratterizzato dal termine della sua vita utile, dall'inadeguatezza per motivi economici o tecnici o da altri fattori pertinenti". Parlare di durabilità degli edifici o delle sue parti significa indicare la loro attitudine a adempiere una funzione per un arco di tempo in cui l'influenza di agenti esterni non pre-



giudichi l'utilizzo, ma comunque dipendente dalle condizioni al contorno d'uso e dal tipo di applicazione (es. durata di vita di un subsistema dell'edificio, di un'unità di superficie di una copertura esposta all'ambiente marittimo; durata di vita di un elemento che costituisce il manufatto, un serramento, un pannello di chiusura;...).

Praticamente la durabilità reale di un edificio è spesso più frequente della durabilità fisica, per cui si parla di obsolescenza legata a fenomeni differenti, come mostrato dallo studio di Rizzi (2002). I livelli di obsolescenza dipendono proprio dalla tipologia e dalle funzioni dell'edificio: i monumenti e le opere d'arte hanno generalmente una grande durata di vita, rispetto agli edifici residenziali, a quelli del terziario e industriali.

La norma ISO 15686 – parte 1 distingue differenti definizioni della durata di vita:

- *Durata di vita*: periodo che comincia con la messa in opera, con la quale un edificio o le sue parti soddisfano completamente o in larga parte le esigenze di prestazione richieste.
- *Durata di vita di progetto e durata di vita reale*: quella di progetto è la durata di vita richiesta dal progettista in accordo con le esigenze dell'utenza. Quella reale dovrebbe corrispondere o essere eventualmente superiore. Per i componenti di durata di vita limitata, è possibile stabilire la durata di vita reale con riferimento alle realizzazioni, quindi a calcoli reali; per i materiali con una lunga durata di vita fisica come le murature in laterizio o in pietra (alcuni esempi hanno più di un secolo di vita), è più difficile stabilire un calcolo globale a lungo termine, anche in relazione ai costi. In quest'ultimo caso si ipotizza una durata di vita teorica, per esempio 60 anni, per poter fare dei calcoli a medio termine.
- *Durata di vita di riferimento*: quella prevista o attesa da un edificio o dalle sue parti secondo alcune condizioni di riferimento ipotizzate.
- *Durata di vita stimata*: quella prevista o attesa da un edificio o dalle sue parti in condizioni di utilizzo specifiche, calcolate in aggiunta alle condizioni di utilizzo dei materiali, dei requisiti progettuali, dell'ambiente, dell'uso e degli interventi periodici.
- *Durata di vita di un edificio e durata di vita di un componente*: va distinta la durata di vita di un componente, di un subsistema e dell'edificio. Il componente che degrada, arriva a fine vita deve essere sostituito per non limitare la vita utile dell'edificio stesso (es. la copertura, con il manto e la lattina, viene sostituito nell'arco della vita utile dell'edificio, con una durata inferiore a quella dell'edificio).
- *Durata di vita e garanzia*: la durabilità è un valore medio sul totale dell'uso e non è una durata di garanzia. La durata in garanzia corrisponde alla durata della maggior parte dei componenti e è più affidabile della durata di vita media di un componente.
- *Durata di vita e interventi*: questa è legata alla possibilità/facilità di intervento e di manutenzione delle parti dell'edificio.

Per il calcolo della durabilità vi sono diverse possibili espressioni: un valore unico, un intervallo di valori (tra minimo e massimo), un valore con un intervallo, un solo valore con informazioni sulla dispersione, quando la distribuzione della durata di vita è riconducibile ad un andamento statistico noto. Ottenere un valore di durabilità è un processo complesso, con difficile controllo del degrado generato dalle diverse caratteristiche ambientali in cui l'edificio si inserisce. La durabilità fisica è un principio basato sulla misura testata della durata di vita degli elementi della costruzione, mentre il degrado è in dipendenza dalle specifiche condizioni di utilizzo.

Riguardo alla durabilità degli edifici e, nello specifico, le definizioni e le esigenze per la durabilità, esistono riferimenti normativi, che esplicitano la richiesta di una durata minima di vita dei componenti delle costruzioni<sup>23</sup>.

L'eurocodice EN 1990 (2002) - *Basis of structural design* definisce quattro classi di durata di vita richieste agli edifici:

	Durata di vita (anni)
Strutture temporanea	1-5
Strutture reversibile e trasformabile	25
Edifici	50
Edifici monumentali e ponti	100

Tab. 1-3: Classi di durata di vita quali requisiti minimi per gli edifici (Fonte: UNI EN 1990, 2006)

Esemplificando, un edificio residenziale rientra apparentemente nella classe di durata di vita superiore a 50 anni, ma senza dubbio, pur non essendo un edificio monumentale, ricade in quella di 100 anni. Si può notare come la durata di vita riguardante gli edifici "normali" sia tipica. Tuttavia non si tratta di durata di vita media reale, ma piuttosto di una durata di vita che si avvicina parzialmente a una durata di vita garantita per il calcolo.

La durabilità è un requisito incluso specificatamente nella Direttiva dei Prodotti da Costruzione (CPD). Le richieste specifiche della Direttiva sono espresse in un documento. Il concetto di durabilità è derivato da due fonti: dalle norme europee EN e dalle *European technical approval* (ETA), che sono le due possibilità per ottenere la marcatura CE, necessaria per l'introduzione nel mercato dei prodotti edilizi.

Nelle prime versioni delle norme europee di prodotto, si indicava che le caratteristiche necessarie delle opere dovevano essere mantenute per una durata di vita economica accettabile. Tuttavia questa durata di vita non viene precisamente indicata e viene richiesta solo la relazione di un test di durabilità, che valuta i fenomeni di degrado per i materiali da costruzione principali.

Nelle norme ATE le indicazioni precise di durabilità, in anni di servizio, rimandano ai rapporti EOTA per fornire delle indicazioni così definite:

- Articolo guida EOTA n°2, *Assumption of working life of Construction Products in Guidelines for European Technical Approval, European Technical Approvals and Harmonized Standards, EOTA Guidance document 002 /edition December 1999*, EOTA, Brussels
- Articolo guida EOTA n°3: *Assessment of working life of products* (December 1999)
- European Organisation for Technical Approvals (EOTA) propone una griglia per ottenere la durata di vita (Tab. 1-4), a cui si rifà anche la ISO 15686-7 (2006), esposta di seguito. EOTA suggerisce anche una classificazione dei requisiti per la durata di vita degli elementi da costruzione a seconda dei tipi di opera e a seconda della facilità di sostituzione degli elementi.

23. Alcune informazioni riportate in questa parte fanno riferimento a contenuti del documento di M. Kornmann "Rapport de recherche (juin 2008) - Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie - Étude bibliographique des avis d'expert", CTMNC, Parigi.

<i>Durata di vita stimata per l'opera</i>		<i>Durata di vita dei materiali da costruzione (anni)</i>		
<i>Categoria</i>	<i>Durata (anni)</i>	<i>Categoria</i>		
		<i>Facilmente riparabile o sostituibile</i>	<i>Riparabile o sostituibile con qualche difficoltà</i>	<i>Lunga durata di vita<sup>b</sup></i>
Breve	10	10 <sup>a</sup>	10	10
Media	25	10 <sup>a</sup>	25	25
Normale	50	10 <sup>a</sup>	25	50
Lunga	100	10 <sup>a</sup>	25	100
<b>a</b> In casi eccezionali e giustificati, le durate di vita di 3 e 6 anni possono rientrare in questa categoria, con l'accordo di EOTA e CEN				
<b>b</b> Quando non riparabile e non facilmente sostituibile e con difficoltà				

Tab. 1-4: *Tempi di vita utile indicative per opere e per sistemi e prodotti (Fonte: rapporto EOTA, 1999)*

Dentro questa classificazione, EOTA riprende le categorie dell'Eurocodice, dal momento che si tratta di corrette informazioni del valore di durata di vita media dei prodotti, che potrebbe essere anche più elevata. Per i prodotti in laterizio, questa classificazione sembra vantaggiosa poiché si possono far rientrare chiaramente i blocchi portanti in laterizio nei prodotti rispondenti ai requisiti di un'opera con una durata di vita lunga (100 anni) e associare la muratura a un sistema della costruzione con una lunga durata di vita (100 anni). Le tegole e i laterizi per i tamponamenti rientrano nella categoria "sostituibili con qualche difficoltà" e dovranno avere una durata di vita minima di 25 anni. La Direttiva dei Prodotti da Costruzione è attualmente in revisione e non è prevedibile la sua evoluzione, anche se pare sia stata inserita una nuova esigenza: l'uso durevole delle risorse naturali. La norma ISO/CD 15686 – parte 1 definisce le stesse classi d'esigenza di durata di vita dei componenti in funzione della durata di vita degli edifici e della sua accessibilità nel tempo. Questa introduce una classe di durata più corta, intermedia (15 anni), una durata media più lunga di quella dell'EOTA (60 anni e non 50) e introduce due classi di durata più prolungate (150 anni e durata illimitata) e i requisiti sui componenti sono parzialmente differenti.

Nel panorama internazionale, le norme del Canada presentano indicazioni sulle durate di vita richieste agli edifici. I dati sulle durate sono forniti da esempio e i requisiti corrispondono a quelli del rapporto EOTA. La durata di vita prevista per un edificio industriale è tra i 25 e 49 anni (una vita media). Quella di un edificio residenziale, di una scuola o un ospedale sono in un intervallo tra 50 e 99 anni (una vita prolungata). I monumenti dovrebbero avere una durata di vita superiore ai 100 anni.

Dal confronto delle diverse fonti normative emerge come gli edifici commerciali richiedano una durata di vita inferiore rispetto a quella degli edifici residenziali, per cui le esigenze sono più elevate in termini di durata di vita e di servizio. Inoltre a seconda della durata di vita degli edifici, la durata di vita richiesta ai suoi componenti si differenzia in funzione della facilità di montaggio/smontaggio e sostituzione. Le categorie con una durata di vita degli edifici elevata, comunque comune e tipica, corrisponde a un arco temporale di servizio superiore ai 100 anni per l'Eurocodice, l'EOTA e la normativa canadese o ai 150 anni per la ISO 15686.

<i>Durata di vita dell'edificio di progetto</i>	<i>Componenti inaccessibili o strutturali</i>	<i>Componenti con sostituzioni difficili o costose</i>	<i>Componenti sostituibili</i>	<i>Impianti</i>
illimitata	illimitata	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10
<b>Nota 1</b> I componenti frequentemente sostituibili possono avere una durata di vita da 3 a 6 anni				

Tab. 1-5: Indicazioni sulla durata di vita minima per i componenti (anni) (Fonte: ISO 15686, 2006)

<i>Categoria</i>	<i>Durata di vita di progetto per categorie</i>	<i>Esempi</i>
Temporaneo	Fino a 10 anni	<ul style="list-style-type: none"> <li>costruzioni temporanee, uffici per le vendite, alloggi provvisori</li> <li>edifici per mostre o eventi temporanei</li> </ul>
Con vita media	Tra 25 e 49 anni	<ul style="list-style-type: none"> <li>la maggior parte degli edifici industriali</li> <li>strutture per parcheggi</li> </ul>
Con vita di lunga durata	Tra 50 e 99 anni	<ul style="list-style-type: none"> <li>edifici residenziali, commerciali e per il terziario</li> <li>edifici per la sanità e l'educazione</li> <li>strutture per autorimesse sotto edifici progettato per la categoria di vita prolungata</li> </ul>
Eterno	Periodo minimo 100 anni	<ul style="list-style-type: none"> <li>monumenti o edifici tutelati (musei nazionali, gallerie d'arte, archivi)</li> <li>edifici tutelati dai beni culturali</li> </ul>

Tab. 1-6: Tabella con le durate di vita richieste agli edifici in Canada (Fonte: Kornmann, 2008)

I dati relativi alla vita utile degli edifici, alla durabilità dei materiali e al degrado delle loro prestazioni sono sempre fortemente influenzati dal contesto di riferimento. Inoltre, gli edifici, rispetto ad altri manufatti, hanno generalmente vite molto lunghe, che spesso si protraggono ben oltre quelle ipotizzate in fase di programmazione e progettazione, e durante le quali possono presentarsi eventi difficilmente prevedibili e di cui è altrettanto difficile anticipare le ripercussioni sulle durate e sul comportamento ambientale. Ma non per questo si deve rinunciare a comprendere meglio le implicazioni della durata dei materiali fin dalle prime fasi progettuali, tanto più se si sceglie di unire molti materiali diversi nel medesimo componente o sistema edilizio. La complessità della valutazione offre, infatti, l'opportunità per comprendere più a fondo l'intima relazione che nel progetto lega le scelte costruttive con il tempo e con l'ambiente. I risultati ottenuti, ancorché condizionati dall'incertezza dei dati di partenza, possono essere considerati di grande utilità nel fornire indicazioni per scelte di progetto sicuramente più consapevoli.



## 2

### ANALISI DEL CICLO DI VITA E METODOLOGIA *LIFE CYCLE ASSESSMENT* A SUPPORTO DEL PROGETTISTA

Per costruire un edificio secondo i criteri della sostenibilità non si può oggi prescindere dalla ricerca di equilibrio tra uso delle risorse ed impatto ambientale; ricerca che necessariamente chiama in causa un cambio di gerarchia tra i paradigmi del progetto, che va ripensato su nuove basi e scenari nel tempo della vita del manufatto architettonico. In questo capitolo viene indagato non solo il tema della progettazione alla scala dell'edificio, ma quello ben più significativo della progettazione della vita dell'edificio, mettendo in luce come la dimensione temporale, e non solo quella spaziale, siano oggi entrambe fondamentali e vadano declinate alle diverse scale del costruito. L'approccio del *Life Cycle Thinking* LCT appare un valido supporto del rinnovamento in corso nel processo progettuale. Si tratta di un criterio attraverso il quale è possibile compiere azioni o assumere decisioni con consapevolezza rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio, del processo e del prodotto in esame.

Tale approccio legato all'analisi del ciclo di vita, nato alla fine degli anni Sessanta negli Stati Uniti, importato nel decennio successivo in Europa (Baldo, 2005), per far fronte alla prima crisi energetica e del consumo di risorse, è stato considerato l'unico percorso d'indagine del cammino compiuto dalle materie prime costituenti un determinato componente (a partire dall'estrazione fino ai processi di lavorazione, trasporto, uso, manutenzione e futura dismissione) scientificamente efficace a quantificare gli impatti ambientali correlati. La valutazione delle conseguenze ambientali della realizzazione e dell'uso di un manufatto mette in luce l'esigenza di affrontare, fin dall'ideazione e dalla progettazione, il problema della prevenzione e della riduzione degli impatti ambientali.

Entrano in gioco fenomeni molto rilevanti relativi ai cambiamenti a carattere sociale, economico e culturale, alle implicazioni ecologiche dell'attività edilizia e agli strumenti e alle tecniche a cui fare riferimento. L'analisi del ciclo di vita di un edificio intero presuppone la scomposizione in sottovalutazioni dei componenti che lo costituiscono. Questa operazione può apparire semplice, ma va riconosciuto come sul piano operativo diventi una pratica molto complessa, a causa dell'innumerabile quantità di informazioni, che caratterizzano ogni componente, ogni processo e ogni fase del ciclo di vita dell'edificio, suscettibile a molti fattori di variazione rispetto a comuni oggetti di consumo. Va contrastata la tendenza attuale a una semplificazione eccessiva dei fenomeni complessi, che porta a interpretazioni anche molto lontane dalla realtà o addirittura sbagliate rispetto ai principi di eco-efficienza richiesta al settore edilizio. Con il presupposto che la valutazione della sostenibilità sia indispensabile, non vanno sottovalutate alcune peculiarità.

La valutazione degli impatti ambientali del ciclo di vita edilizio si definisce come il processo di identificazione dei carichi ambientali, attraverso l'analisi e la quantificazione di energia

e materiali utilizzati e di emissioni rilasciate nell'ambiente. Lo scopo della valutazione è individuare le possibilità di riduzione degli impatti e il miglioramento e ottimizzazione del comportamento ambientale (SETAC, 1993). Sono molti i metodi predisposti, adattati, codificati per valutare la sostenibilità degli edifici. In particolare la gamma si moltiplica se si fa riferimento ai metodi basati sulla associazione di un punteggio a indicatori significativi riferiti all'uso razionale delle risorse, all'efficienza energetica, al benessere comfort interno. Sono i metodi di valutazione multicriteri secondo i quali viene assegnato un punteggio di merito rispetto a differenti aspetti, in base al maggiore o minore soddisfacimento dei requisiti verificati tramite indicatori<sup>1</sup>. Nonostante appaiano una via facilmente percorribile da tutti gli operatori del settore, presentano alcune criticità da non sottovalutare: a. l'approccio semplificato fa sembrare che non siano necessarie competenze specialistiche per fare una valutazione, b. l'approccio prestazionale che li identifica viene messo in discussione dal numero di indicatori presenti, spesso riferiti a un approccio prescrittivo, c. il metodo tende a valorizzare l'efficienza di singoli componenti o parti dell'organismo edilizio rispetto a una valutazione complessiva dei risultati (come già più volte sottolineato l'eco-efficienza dell'edificio non emerge dalla somma dell'efficienza dei singoli sottosistemi, che spesso singolarmente soddisfano aspetti che sono negativi per altre parti dell'edificio) (Lavagna, 2009). I sistemi multicriteria e a punteggio offrono valutazioni parziali, non sempre basate sugli aspetti legati al ciclo di vita dell'edificio. Occorre porre molta attenzione a sommarie generalizzazioni. L'orientamento verso la valutazione degli impatti ambientali da parte dei progettisti inoltre deve anche prendere in considerazione nuovi orizzonti: dall'individuazione delle risposte in termini di soluzione tecnica (usare materiali riciclati, usare componenti naturali o installare impianti per energia alternativa) è necessaria una trasposizione del pensiero progettuale all'individuazione dei requisiti progettuali calibrati su esigenze precise e perseguibili nel caso specifico.

L'ambito di riferimento metodologico che permette di evidenziare gli impatti ambientali nella vita di un materiale, un componente, un sistema costruttivo o un edificio, e i relativi processi realizzativi, e di confrontare le diverse fasi del ciclo di vita è la 'Valutazione del Ciclo di Vita'. *Life Cycle Assessment* è una metodologia che consente indagini analitiche del ciclo di vita del prodotto al fine di valutare i consumi energetici e gli impatti ambientali generati, dovuti alla realizzazione di prodotti, all'applicazione di processi e alla gestione dei servizi. Attraverso la ricerca e lo sviluppo di strumenti di supporto, l'analisi degli impatti allargata all'intero ciclo di vita di un prodotto, manufatto o processo si sta evolvendo verso un uso più allargato, che va dal supporto alla comunicazione ambientale e al '*green marketing*' fino all'integrazione con la progettazione 'eco-sostenibile' come strumento di orientamento decisionale. La valutazione di impatto ambientale risponde a un principio semplice: il principio di prevenzione, fin dalla fase concettuale del progetto, come migliore politica di tutela dell'ambiente, ovvero la verifica di tutte le possibili cause di impatto ambientale, anziché il principio di responsabilità, come constatazione degli effetti a opera completa. La metodologia non rappresenta solo un mezzo per la salvaguardia dell'ambiente, ma può

---

1. A livello internazionale esistono diversi strumenti di valutazione a punteggio per la certificazione ambientale degli edifici: il BREEAM inglese (*BRE Environmental Assessment Method*), HQE francese (*Haute Qualité Environnementale*), Eco-bau svizzero, Total Quality austriaco, il LEED americano (*Leadership in Energy and Environmental Design*), il GBTool internazionale gestito da *Green Building Challenge* e iISBE (*International Initiative for a Sustainable Built Environment*), il CASBEE giapponese, *Green Star* australiano, il Protocollo italiano ITACA (Istituto per l'Innovazione e Trasparenza degli Appalti e della Compatibilità Ambientale) e altri ancora. (Lavagna, 2009, pp. 170-182)

infatti diventare anche un importante strumento per il rafforzamento delle dinamiche competitive e di riduzione e controllo dei costi.

Attraverso lo studio del ciclo di vita di un manufatto edilizio si valuta il danno ambientale in tutte le fasi del ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime, alla produzione, all'utilizzo ed infine allo smaltimento o al riciclo dei materiali, inventariando gli input (materia ed energia assorbita) e gli output (emissioni e rifiuti) prodotti nel corso dei diversi processi e traducendoli in impatti ambientali tramite un processo di caratterizzazione e con l'utilizzo di indicatori ambientali. Un aspetto rilevante dell'applicazione di questa metodologia è quello di permettere la comparazione, già in fase di progetto preliminare, tra diverse soluzioni costruttive, prodotti o processi, aventi la stessa funzione, per poter scegliere la soluzione a minor impatto e per mettere in evidenza le caratteristiche ambientali positive e negative di ognuna di queste. Mediante un'analisi di tipo iterativo, si può valutare l'efficacia in termini di miglioramento, rendendo questa analisi uno strumento sempre aggiornabile in modo flessibile e adattabile a cambiamenti.

L'analisi del ciclo di vita nell'ambito del settore delle costruzioni trova efficace applicazione a ridosso:

- del *processo produttivo* con finalità di ottimizzazione, tramite individuazione e modifica, delle fasi di lavorazione a maggior impatto energetico-ambientale e di individuazione dei processi e materiali che meglio sintetizzano caratteristiche prestazionali e comportamento ambientale;
- del *processo progettuale* a supporto del progettista lungo il processo decisionale, orientando le scelte materiche verso componenti ad elevate/adequate prestazioni e impatto ambientale ridotto rispetto al contesto territoriale e temporale del progetto;
- del *processo costruttivo* a supporto dell'organizzazione e gestione del cantiere, in relazione alla tossicità sull'ecosistema e sull'uomo, ovvero gli operatori di cantiere oltre che gli utenti finali;
- della *fase operativa* come strumento di scelta di materiali e componenti salubri dal punto di vista ambientale (*health indoor quality*) e di tossicità sull'uomo nel medio e lungo periodo;
- della *fase post-operativa* a supporto della previsione di scenari di fine vita di materiali e componenti dell'edificio, in relazione ai requisiti progettuali di flessibilità d'uso e nel tempo e di riuso dell'edificio o delle sue singole parti.

Nello specifico del settore edile si stanno rinforzando un quadro normativo definitivo e armonizzato e le strumentazioni da utilizzare per il controllo degli impatti degli edifici sull'ambiente; le sperimentazioni cui fare riferimento cominciano a proliferare. Sono emersi alcuni risultati positivi nell'ambito di riferimento, attraverso lo sviluppo di orientamenti specifici e l'introduzione delle etichettature ambientali. La normativa in materia ambientale si articola in norme e regolamenti per la gestione e qualificazione ambientale dei processi e dei prodotti<sup>2</sup> e si basa sulla dichiarazione volontaria, vale a dire indicazioni e indirizzi di atteggiamento ambientale non cogente.

Con l'avvento del mercato unico europeo per i prodotti da costruzione, la Commissione Europea ha valutato come le dichiarazioni ambientali di prodotto e gli schemi di valutazione

---

2. Un quadro dettagliato ed esaustivo dell'evoluzione normativa che caratterizza la valutazione degli impatti ambientali di prodotti e di edifici è consultabile nell'approfondita rassegna in Monica Lavagna (2008), in Monica Lavagna (2009).



di impatto ambientale degli edifici sviluppati dalle varie autorità nazionali potessero rappresenterebbe un ostacolo agli scambi in tutta Europa. L'Unione Europea ha quindi esposto un mandato agli Stati membri per sviluppare norme europee che armonizzassero la valutazione delle performance di sostenibilità nel settore delle costruzioni e dei prodotti edilizi. Questo mandato è chiamato CEN/TC 350- *Sustainability of construction works*. La Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 del 1989 è stata una delle prime direttive dalla Commissione Europea a creare un quadro comune per le norme relative agli edifici e ai prodotti da costruzione. Questa è operativamente sostituita dal regolamento sui prodotti da costruzione (*Construction Product Regulation – CPR (EU) No. 305/2011*), in vigore dal 1 luglio 2013, ed è giuridicamente vincolante in tutta l'Unione Europea.

Per il progettista e i diversi operatori del settore è tutt'altro che semplice potersi orientare in un contesto assai articolato e anche contraddittorio per molti aspetti, dal punto di vista della normativa e dei metodi di valutazione da utilizzare. Punti certi e condivisibili dalla collettività scientifica del settore esistono e si riferiscono alle finalità della sostenibilità ambientale nel progetto dell'edificio, metabolizzate sotto forma di esigenza di risparmio di materie prime, di energie, di acqua e di suolo, esigenza di riduzione delle emissioni nocive in acqua, aria e suolo e della produzione di rifiuti e esigenza di salvaguardare la salute umana e gli equilibri naturali. Tali finalità sono ribadite a livello europeo nell'allegato I della CPR in cui:

- Nel punto 5 requisito "Igiene, salute e ambiente" vi è la raccomandazione che le opere da costruzione vengano concepite e realizzate in modo da non rappresentare, durante il loro intero ciclo di vita, una minaccia per l'igiene o la salute e la sicurezza dei lavoratori, degli occupanti o dei vicini e da non esercitare un impatto eccessivo, per tutto il loro ciclo di vita, sulla qualità dell'ambiente o sul clima, durante la loro costruzione, uso e demolizione, in particolare a causa di uno dei seguenti eventi: a) sviluppo di gas tossici; b) emissione di sostanze pericolose, composti organici volatili (VOC), gas a effetto serra o particolato pericoloso nell'aria interna o esterna; c) emissioni di radiazioni pericolose; d) dispersione di sostanze pericolose nelle falde acquifere, nelle acque marine, nelle acque di superficie o nel suolo; e) dispersione di sostanze pericolose o di sostanze aventi un impatto negativo sull'acqua potabile; f) scarico scorretto di acque reflue, emissione di gas di combustione o scorretta eliminazione di rifiuti solidi o liquidi; g) umidità in parti o sulle superfici delle opere da costruzione.
- Nel punto 6 "Risparmio energetico e ritenzione del calore" vi è indicazione affinché le opere da costruzione e i relativi impianti di riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e aerazione debbano essere concepiti e realizzati in modo che il consumo di energia richiesto durante l'uso sia moderato, tenuto conto degli occupanti e delle condizioni climatiche del luogo. Le opere da costruzione devono inoltre essere efficienti sotto il profilo energetico e durante la loro costruzione e demolizione deve essere utilizzata quanta meno energia possibile.
- Nel punto 7 "Uso sostenibile delle risorse naturali" la raccomandazione richiede che le opere da costruzione debbano essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare quanto segue: a) il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione; b) la durabilità delle opere di costruzione; c) l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.

Invece è sicuramente più complicato individuare le strategie operative da mettere in atto per rispondere concretamente a tali finalità, oltre alla difficoltà successiva di verifica, tramite metodi di valutazione, se sono stati soddisfatti gli obiettivi.

Non è ancora pensabile di poter disporre di tutta l'informazione necessaria e esaustiva per poter compiere scelte efficaci nel breve e nel lungo periodo. È attualmente significativo affrontare il problema della valutazione della sostenibilità con l'apertura progettuale più ampia possibile e una corretta propensione alla sperimentazione di nuovi percorsi del processo progettuale e costruttivo, oltre che con serietà scientifica.

### 2.1. Procedure e dati per il computo dei flussi metabolici dell'edificio

Al fine di incentivare una vera e propria prassi nella direzione della disseminazione e comprensione della metodologia *Life Cycle Assessment* per la valutazione degli impatti ambientali in tutte le fasi del ciclo di vita è necessario proseguire alla sensibilizzazione degli attori del processo, dei produttori e dei consumatori. È necessaria una maggior responsabilizzazione a tutti i livelli e una trasparente disseminazione delle informazioni ambientali, affinché i requisiti ambientali diventino indispensabili alla corretta costruzione e gestione degli edifici. L'approccio per indicatori sintetici della valutazione degli impatti ambientali LCA, di tipo prestazionale ovvero basato sul carico ambientale effettivo dell'edificio e dei suoi sub-sistemi senza condizionare le scelte progettuali, non è intuitivo come altri metodi a punteggio, di tipo prescrittivo-decrittivo, e quindi meno *user-friendly* per i progettisti e gli operatori del settore; necessita di competenza esperta. Tuttavia dal punto di vista normativo è la procedura preferita proprio per il rigore scientifico e l'attendibilità dei risultati.



Fig. 2-1: Schema operativo della procedura di analisi del ciclo di vita secondo la normativa della serie ISO 14040 (grafica di Laura Carrera).

Secondo la serie delle normative ISO 14040:2006, ISO 14041:1998, ISO 14042:2000, che descrivono e inquadrano i principi per la valutazione del ciclo di vita, la metodologia LCA si struttura essenzialmente di quattro fasi sequenziali: due fasi scientifiche e di una certa complessità – l'analisi dell'Inventario (*Inventory Analysis*) e la Valutazione degli Impatti (*Impact Assessment*) – interposte tra due fasi meno laboriose e più definitorie, quali la Definizione di Obiettivo, Confini del sistema, Unità funzionale e Funzione del sistema (*Goal and Scope Definition*) all'inizio della procedura e la Valutazione dei possibili miglioramenti o Analisi di sensitività (*Improvement Assessment* (secondo SETAC), *Valuation* (secondo UBA) o *Interpretation* (secondo ISO)) come fase conclusiva dell'analisi.

La fase preliminare della analisi LCA contempla la Definizione degli obiettivi dello studio e dei confini del sistema (*Goal and Scope Definition*) ed è la fase preliminare in cui vengono definite le finalità dello studio, le unità funzionali, i confini del sistema, il fabbisogno di dati, le assunzioni e i limiti. È fondamentale, infatti, conoscere le ragioni dello studio, poiché l'analisi viene finalizzata alla soluzione di tematiche ben definite, e la stessa interpretazione dei risultati è strettamente dipendente dallo scopo. In questa fase si procede nella descrizione del sistema oggetto di studio, dei suoi confini, delle categorie di dati necessari, del livello di dettaglio che si intende raggiungere.

Operativamente si redige uno schema di informazioni preliminari: a. obiettivo dello studio; b. motivazioni per eseguire lo studio; c. applicazioni previste; d. destinatari dello studio.

Segue la descrizione del campo di applicazione dello studio: a. delle funzioni del sistema, che rappresentano le prestazioni richieste al prodotto; b. dell'unità funzionale, ovvero del valore di riferimento rispetto al quale è possibile comparare i dati di bilancio ambientale del sistema; c. dei confini iniziali del sistema, in cui vengono determinate le unità di processo che costituiranno il diagramma dei flussi di materia e energia dettagliati successivamente nell'analisi di inventario; d. della qualità dei dati utilizzati, per stabilire l'affidabilità dei risultati dello studio.

A questa segue l'inventario *Life Cycle Inventory (LCI)* di tutte le sostanze coinvolte (in entrata e in uscita) nei processi di produzione dell'oggetto in analisi, sia esso un materiale, un prodotto, un componente, un sistema costruttivo o un edificio. Consiste nell'individuazione e nella quantificazione dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema oggetto di analisi lungo tutta la sua vita. Vengono identificati e quantificati i consumi di risorse di energia e le emissioni in aria, acqua e suolo, arrivando così a strutturare un vero e proprio bilancio ambientale.

La fase *LCI – Life-Cycle Inventory* – è la base per ogni studio LCA, e rappresenta uno degli aspetti più problematici e delicati dell'intera analisi. Secondo la definizione della norma ISO 14041, si tratta di “*individuare i flussi in ingresso e in uscita da un sistema/componente/prodotto, lungo il suo intero ciclo vitale*”.

In questa fase l'obiettivo principale è la quantificazione delle risorse coinvolte nel ciclo di vita del materiale, e l'identificazione delle sue principali caratteristiche. Per ogni prodotto, quindi, vengono compilate delle schede informative nelle quali sono presenti le principali caratteristiche ambientali: le materie prime impiegate, i trasporti, le emissioni gassose in atmosfera che esso produce, le emissioni nel terreno e in acqua, i rifiuti solidi, l'energia termica o elettrica impiegata.

Non vengono associati, per ora, gli effetti ambientali alle caratteristiche proprie e produttive dell'oggetto di inventario. Questo compito verrà rimandato alla fase seguente, *LCIA - Life Cycle Inventory Assessment*. Il principale ambito di interesse, per la presente fase, è il reperimento di dati di inventario il più possibile precisi e attendibili.

Il procedimento di compilazione dei dati di inventario su un prodotto e sui relativi processi è iterativo. Man mano che si ottengono dati in maggiore quantità e più approfonditi, e il sistema diviene più conosciuto, è possibile identificare nuovi requisiti o limitazioni, che a loro volta vanno a formare un quadro d'insieme più completo e preciso.

Per arrivare alla descrizione esauriente di un prodotto è possibile identificare quattro fasi di studio:

**Schema del diagramma di flusso (*Process flow-chart*):** Il processo viene descritto con una rappresentazione grafica di tutte le fasi rilevanti e di tutti i processi coinvolti nel ciclo di vita del prodotto. Il diagramma di flusso è composto da sequenze di processi (*boxes*) collegati da flussi (freccie). In questo modo il sistema viene esplicitato in sottoinsiemi, tra i quali vengono individuate le interazioni (*feedback*); inoltre, vengono individuati gli aspetti sui quali porre maggiore attenzione, per l'analisi ambientale;

**Raccolta dei dati (*Data collection*):** è la fase più onerosa, in termini di tempo e di impegno. Le informazioni necessarie da ricercare sono tante e comprendono tutte le fasi del processo produttivo. La difficoltà maggiore consiste, comunque, nel reperimento di dati. Nella migliore delle ipotesi, essi dovrebbero provenire dal rilevamento diretto nella sede di una specifica azienda produttrice o di una impresa costruttrice; in questo caso la fonte è diretta e i dati sono specifici e precisi. Un'altro tipo di risorsa, meno precisa ma di più semplice applicazione, è costituita da *database* provenienti da manuali o da software specifici per gli inventari. In casi non contemplati dalla letteratura, è possibile procedere per analogie, effettuando calcoli piuttosto complicati. La raccolta dei dati viene poi rappresentata con una tabella (*data sheet*), in cui le caratteristiche sono disposte ordinatamente. Una compilazione di questo tipo permette anche di ottenere informazioni importanti circa i punti critici del sistema e l'origine di particolari effetti negativi sui quali è possibile intervenire.

Compilato da:			Data di compilazione:	
Identificazione unità di processo:			Fonti di comunicazione:	
Descrizione unità di processo: (allegare foglio supplementare, se necessario)				
Materiali in ingresso	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Origine
Consumo di acqua	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Origine
Flussi energetici in ingresso	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Origine
Materiali in uscita (compresi i prodotti)	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Origine
Emissioni in aria	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Note
Emissioni in acqua	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Note
Emissioni nel suolo	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Note
Altre emissioni (rumore, radiazioni, ecc)	Unità di misura	Quantità	Descrizione procedure campionamento	Note

Tab. 2-1: Esempio di data sheet da compilare (Fonte: elaborazione su dati da Centro Ricerche ENEA, 2005)

Definizione delle condizioni di contorno (*System boundaries*): vengono qui definiti i confini del sistema studiato. Si indicano le motivazioni che consentano di giudicare rilevanti o irrilevanti determinati processi, scegliendo cosa includere e cosa trascurare nell'analisi;

Elaborazione dei dati (*Data Processing*): i dati precedentemente raccolti sono qui corredati con una quantificazione per "unità di processo" - ad esempio l'ammontare di energia elettrica per la produzione di un Kg di prodotto, la quantità di materia prima utilizzata per produrre un Kg di prodotto e altre indicazioni utili - utilizzando indicatori con unità di misura standardizzate.

È una fase complessa, nella quale risulta ancora difficile reperire, in modo esaustivo, le informazioni relative a materiali coinvolti, ai processi produttivi, e alle relative emissioni, dalle aziende del settore. Una premessa fondamentale per definire gli effetti sull'ambiente, sull'uomo e sull'equilibrio naturale è la conoscenza completa e esaustiva dei processi di estrazione, produzione e lavorazione dei prodotti e dei materiali, la conoscenza delle loro composizioni e i loro comportamenti in un periodo di tempo presumibile. Quando non si dispone di informazione primaria per i processi di produzione di materiali e componenti, per accordare omogeneità di informazione e di risultati, è lecito ricorrere ai dati secondari, fruibili attraverso *data-base* stranieri, in cui sono raccolti molti processi produttivi di componenti per l'edilizia (energie, trasporti, uso del suolo delle fabbriche, emissioni per la produzione, produzione di rifiuti). Le banche dati di riferimento più conosciute sono:

- DataArchive, la banca-dati standard redatta da Pré Consultant che contiene voci svizzere, olandesi e svedesi leggermente datate (1988-95);
- BUWAL 250 (1997) che si riferisce a dati svizzeri dell'EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Material and Science Technology*);
- ETH-ESU (1996) sviluppata dall'*Eidgenössische Technische Hochschule* ETH di Zurigo;
- IDEMAT 2001 sviluppata dalla Delft *University of Technology, Department of Industrial Design Engineering*;
- FRANKLIN US LCI che contiene dati su base americana (2003);
- IVAM LCA Data 4.04, una banca dati olandese redatta dal *Dipartimento di ricerche per l'ambiente* della *University of Amsterdam UvA*;
- Ecoinvent V.3, *Swiss Centre for the Life Cycle Inventories*, la banca dati svizzera più recente (2004) che contiene circa 2500 processi, per la cui redazione hanno contribuito sei istituti svizzeri (ETHZ, EPFL, PSI, Empa and ART);
- ELCD core database version 1.0.1 (*ELCD core data sets*), pubblicata *on-line* dalla Commissione Europea, *Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability (JRC-IES)*, elaborata dalla Piattaforma Europea sulla Valutazione del Ciclo di Vita, *European Platform on Life Cycle Assessment (EP-LCA)*;
- banca dati anglosassone *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, elaborata dai proff. G. Hammond & C. Jones dell'Università di Bath, del *Sustainable Energy Research Team (SERT), Dept. of Mechanical Engineering*;
- banca dati francese INIES relativa ai dati ambientali (EPD) e di durata di vita di materiali edilizi;
- banca dati anglosassone contenente i profili ambientali nel ciclo di vita edilizio *Environmental Profiles* del *British Research Establishment (BRE)* di materiali da costruzione, prodotti e sistemi edilizi presenti sul mercato e specifici di produttori del settore.

Material Profile: Steel										
Embodied Energy (EE) Database Statistics - MJ/Kg										
Main Material	No. Records		Average EE		Standard Deviation	Minimum EE	Maximum EE	Comments on the Database Statistics:		
Steel	186		31.25		16.50	8.00	85.70	None		
Steel General	154		29.38		13.45	8.00	77.00			
30% Recycled	2		32.75		20.86	18.00	47.50			
Market Average	11		25.00		5.92	18.20	36.00			
Other Specification	3		19.40		0.71	18.90	19.90			
Predominantly Recycled	33		13.60		4.86	6.00	23.40			
Unspecified	48		31.06		10.61	12.50	77.00			
Virgin	57		37.45		12.07	12.00	63.42			
Steel Stainless	21		45.08		28.84	8.20	86.70			
Market Average	3		48.38		6.22	40.20	51.49			
Predominantly Recycled	2		11.00		0.00	11.00	11.00			
Unspecified	8		43.10		32.21	8.20	95.70			
Virgin	8		57.80		28.76	12.00	81.77			
Steel Structural	5		30.81		3.74	25.50	35.90			
Unspecified	2		28.67		4.43	25.50	31.83			
Virgin	3		32.40		3.10	30.00	35.90			
Selected Embodied Energy & Carbon Values and Associated Data										
Material	Embodied Energy - MJ/Kg			Embodied Carbon - Kg CO2/Kg			Boundaries	Best EE Range - MJ/Kg		Specific Comments
	UK Typical	Primary	Secondary	UK Typical	Primary	Secondary		Low EE	High EE	
General Steel	24.4	35.3	9.50	1.77	2.75	0.43	Cradle to Gate	(±10%)		Estimated from UK's consumption of types of steel and worldwide recycled content 45.7%.
Bar & rod	24.0	36.4	8.8	1.71	2.68	0.42				
Engineering steel	-	-	13.1	-	-	5.68				
Pipe	-	34.4	NTMR	-	2.7	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
Plate	-	48.4	NTMR	-	3.19	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
Section	25.4	36.8	10.0	1.78	2.78	0.44				
Sheet	-	31.5	NTMR	-	2.51	NTMR				NTMR = Not Typical Manufacturing Route
Sheet - Galvanised	-	39.0	-	-	2.82	-				
Wire	-	36.0	-	-	2.83	-				
Stainless	36.7	-	-	6.15	-	-		11	81.8	4.3 MJ/kg Feedstock Energy (included). (World average data from Institute of Stainless Steel Forum (ISSF) was selected due to the large extent of the study. Values specified are for the most popular grade (304).

Fig. 2-2: Visualizzazione tipica di una voce da banca dati Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a (Fonte: ICE, Cambridge)


		<b>Approved Environmental Profile</b> Characterised and Normalised Data for: <b>1 square metre over 60 Year Study Period; External Wall Construction: Cladding on timber framed construction (ax wall type 5a); Rockpanel Durable and timber battens, breather membranes, 22mm OSB Ply, Structural timber frame, insulation, polythene sheet VCL, plasterboard on battens, paint</b>	
<b>Quality of Data for Profiled Material (Data for other constituent materials are available from BRE Global)</b> Start Date: 01/01/2008 End Date: 31/12/2008 Representativeness: 1 site representing 100% of production LCA Methodology: 2008 BRE Environmental Profiles Methodology Allocation: 100% to product Date of Data Entry: 11/11/2010 Boundary: Cradle to Grave over 60 Year Study Period Applicable Buildings: All building types Comments: Service life changed from 40 to 60 years upon receiving new evidence from Rockpanel prior to publication		Source of Data: Company production records Geography: NL	
Issue		Characterised Data	
Climate Change	59	kg CO2 eq. (100yr)	
Water Extraction	1	m³	
Mineral Resource Extraction	0.007	tonnes	
Stratospheric Ozone Depletion	0.00013	kg CFC11 eq.	
Human Toxicity	63	kg 1,4-DB eq.	
Ecotoxicity to Freshwater	8	kg 1,4-DB eq.	
Nuclear Waste (higher level)	0.00000014	m³ high level waste	
Ecotoxicity to Land	0.44	kg 1,4-DB eq.	
Waste Disposal	58	kg	
Fossil Fuel Depletion	1800	MJ	
Eutrophication	0.071	kg PO4 eq.	
Photochemical Ozone Creation	0.13	kg ethene eq.	
Acidification	0.84	kg SO2 eq.	

Fig. 2-3: Informazioni ambientali di prodotto riportate nella banca dati anglosassone Environmental Profiles del BRE di materiali da costruzione, prodotti e sistemi edilizi (Fonte: BRE, UK)

Tous ces impacts sont renseignés ou calculés conformément aux indications du § 6.1 de la norme NF P01-010, à partir des données du § 2 et pour l'unité fonctionnelle de référence par année définie au § 1.1 et 1.2 de la présente déclaration, ainsi que pour l'unité fonctionnelle rapportée à toute la DVT (Durée de Vie Typique).

N°	Impact environnemental	Valeur de l'indicateur pour l'unité fonctionnelle	Valeur de l'indicateur pour toute la DVT
1	Consommation de ressources énergétiques		
	Énergie primaire totale	4,79 MJ/UF	479 MJ
	Énergie renouvelable	0,79 MJ/UF	79 MJ
	Énergie non renouvelable	4,00 MJ/UF	400 MJ
2	Épuisement de ressources (ADP)	0,00427 kg équivalent antimoine (Sb)/UF	0,127 kg équivalent antimoine (Sb)
3	Consommation d'eau totale	0,664 litre/UF	66,4 litre
4	Déchets solides		
	Déchets valorisés (total)	0,000789 kg/UF	0,0789 kg
	Déchets éliminés		
	Déchets dangereux	$7,28 \times 10^{-3}$ kg/UF	0,00728 kg
	Déchets non dangereux	0,00104 kg/UF	0,104 kg
	Déchets inertes	1,72 kg/UF	172 kg
	Déchets radioactifs	$2,03 \times 10^{-3}$ kg/UF	0,00203 kg
5	Changement climatique	0,293 kg équivalent CO <sub>2</sub> /UF	29,3 kg équivalent CO <sub>2</sub>
6	Acidification atmosphérique	0,00273 kg équivalent SO <sub>2</sub> /UF	0,273 kg équivalent SO <sub>2</sub>
7	Pollution de l'air	$21,15 \text{ m}^3$ /UF	$2.115 \text{ m}^3$
8	Pollution de l'eau	$0,231 \text{ m}^3$ /UF	$23,1 \text{ m}^3$
9	Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	0 kg CFC équivalent R11/UF	0 kg CFC équivalent R11
10	Formation d'ozone photochimique	$2,27 \times 10^{-3}$ kg équivalent éthylène/UF	$2,27 \times 10^{-3}$ kg équivalent éthylène
11	Eutrophication	$2,29 \times 10^{-4}$ kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /UF	$2,29 \times 10^{-2}$ kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>

Fig. 2-4: Informazioni ambientali di un prodotto in laterizio riportate nella banca dati francese INIES – Declaration Environnementale et Sanitaire Conforme A La Norme NF P 01-010 (Fonte: [www.inies.fr](http://www.inies.fr), 2013)

Come emerge diversi gruppi di lavoro stanno compiendo enormi sforzi per imporre dichiarazioni per quanto possibile complete dei prodotti da costruzione, per mettere a disposizione banche dati informative sui principali prodotti da costruzione e per sviluppare misurazioni standardizzate. I parametri necessari per la valutazione di impatto ambientale sarebbero a disposizione di tutti se i produttori si impegnassero a elaborare la Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD – Environmental Product Declaration), che viene certificata da enti esterni alle aziende. La EPD rientra fra le politiche ambientali comunitarie (Politica Integrata di Prodotto – *Integrated Product Policy*), è sviluppata in applicazione della norma UNI ISO 14025:2006 (Etichetta Ecologica di Tipo III) e rappresenta uno strumento per comunicare informazioni oggettive, confrontabili e credibili relative alla prestazione ambientale di prodotti e servizi. Costituisce lo strumento più efficace, in particolare nel settore edilizio, ai fini della accessibilità e diffusione dell'informazione ambientale e della

confrontabilità dei dati relativi a prodotti differenti. E' un documento volontario, che costituisce la carta d'identità ambientale di un prodotto commercializzato, dopo una verifica dei contenuti da parte di enti certificatori. Le prestazioni ambientali dei prodotti/servizi riportate nella EPD devono basarsi sull'analisi del ciclo di vita mediante utilizzo del *Life Cycle Assessment* (LCA) in accordo con le norme della serie ISO 14040, fondamento metodologico da cui scaturisce l'oggettività delle informazioni fornite.

Il comitato tecnico del CEN per la sostenibilità dei lavori di costruzione (CEN TC 350 - *Sustainability of construction works*) ha emanato dal 2010 una serie di nuove norme europee per valutare la sostenibilità dei prodotti da costruzione e dell'ambiente costruito, aggiornando le precedenti norme di riferimento sulla sostenibilità delle costruzioni. La recente norma CEN/TR 15941:2010 (*Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Methodology for selection and use of generic data*) offre un riferimento metodologico per la scelta e l'uso di dati primari o generici da valori medi di banca dati. La norma EN 15804:2012 (*Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*), recepita nella versione italiana UNI EN 15804, fornisce regole chiave per categoria di prodotto (PCR) per la predisposizione di Dichiarazioni Ambientali di tipo III relative a prodotti e servizi nel settore delle costruzioni. La norma definisce i parametri da dichiarare e i modi in cui sono raccolti e comunicati; descrive quali fasi del ciclo di vita sono considerate nella dichiarazione ambientale di prodotto (EPD) e quali processi sono da includere; definisce le regole per lo sviluppo di scenari; include le regole per il calcolo d'inventario e la valutazione di impatto nell'analisi del ciclo di vita, alla base della EPD, comprese le specifiche da applicare sulla qualità dei dati; definisce le condizioni per le quali i prodotti da costruzione possono essere confrontati sulla base delle informazioni fornite nella EPD. È il riferimento attuale per l'EPD. Facendo riferimento ai requisiti di sostenibilità ambientale dei prodotti da costruzione esplicitati nell'allegato I punto 7.c della CPR, emerge come per poter disporre di valutazioni dell'impatto ambientale dei prodotti da costruzione sia quanto mai necessario redigere le EPD di prodotto. Consultando gli enti di certificazione europei di terze parti *Environdec* (svedese), *Institut Bauen und Umwelt* e.V. (tedesco), *Inies* (francese), *BRE Certification Limited* (anglosassone), è evidente come negli ultimi anni sia cresciuto il numero di prodotti per le costruzioni con la certificazione EPD. Il trend di crescita delle certificazioni ambientali di prodotto EPD che si sta verificando negli ultimi tre anni in Germania, per esempio, è motivato dall'obbligo imposto dal metodo DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen* - Consiglio Tedesco per l'edilizia sostenibile), atto a prescrivere un sistema di certificazione che riguarda l'intero ciclo di vita di un edificio, di includere nella valutazione LCA dell'edificio solo prodotti da costruzione certificati EPD.

Questo è un segnale positivo da parte delle aziende produttive del settore, tuttavia dal punto di vista del rigore procedurale, addentrandosi nella comparazione dei dati riportati negli EPD di prodotto edilizio, emerge la difficoltà del confronto. I dati sono espressi per indicatori ambientali comuni (come previsto dalla normativa), tuttavia non risulta sempre chiaro e trasparente il processo svolto per raggiungere i numeri indicati, ovvero non si comprendono sempre fino in fondo le allocazioni dei dati, i confini del sistema e le fasi del ciclo di vita contemplate. Alcuni sono molto dettagliati e ben raccontati, altri sono così sintetici da riportare solo i risultati numerici per ogni indicatore ambientale. Occorre pertanto porre attenzione agli oggetti e ai numeri confrontati.



This declaration refers to the manufacturing of 1 m<sup>2</sup> of a standard foil cushion with a mass per unit area of 0,967 kg/m<sup>2</sup>, and the average quantity of frame material required for the assembly of the roof construction.

**Table 8-1: Composition of an ETFE construction element per m<sup>2</sup>**

Material	Mass required [kg/m <sup>2</sup> ]
ETFE foil cushion	0.967
Aluminium profile	4.571
Seal	0.016

The selected standard foil cushion consists of three layers of NOWOFLON<sup>®</sup> ET-foil (top layer 200 µm, middle layer 100 µm and bottom layer 200 µm), keder and valve. Later, during usage it is filled with air.

Impact Categories				
	Unit	Foil cushion	Frame	Transport to the construction site
ADP elementary	[kg antimony eq.]	$1.4 \times 10^{-4}$	$1.6 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-7}$
ADP fossil	[MJ]	$2.5 \times 10^2$	$3.0 \times 10^2$	$1.8 \times 10^2$
GWP	[kg CO <sub>2</sub> eq.]	$1.7 \times 10$	$3.0 \times 10$	$1.3 \times 10$
ODP	[kg R-11 eq.]	$7.0 \times 10^{-6}$	$3.3 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-6}$
AP	[kg SO <sub>2</sub> eq.]	$4.3 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$6.1 \times 10^{-7}$
EP	[kg PO <sub>4</sub> -eq.]	$3.4 \times 10^{-3}$	$6.3 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-7}$
POCP	[kg ethane eq.]	$3.2 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-3}$	$6.1 \times 10^{-3}$

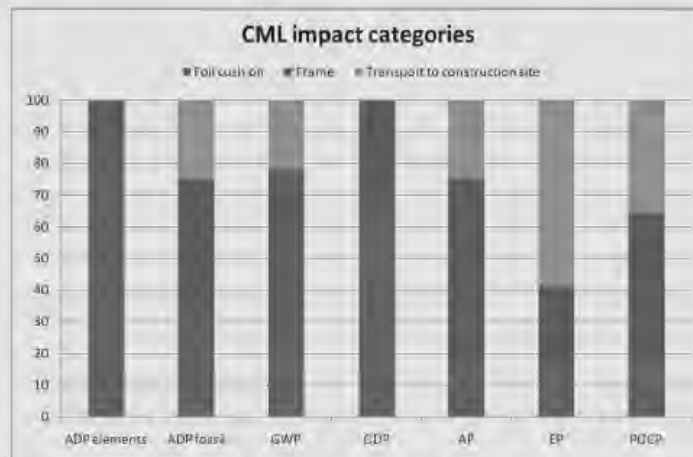


Fig. 2-5: Stralci con la visualizzazione dei dati ambientali riportati nell'“Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 TEXLON<sup>®</sup> System - Vector Foiltec, Nowofol, Dyneon - Declaration number EPD-VND-201111-E”, sistema d'involucro a membrana pneumatica in etfe (Fonte: Institut Bauen und Umwelt e.V., Germania)

			Fase Produzione		Fase d'Uso
Uso di risorse	U.M.	Totale	Produzione coppo	Estrazione ma- terie prime	Distribuzione
<b>Non rinnovabili</b>					
Senza contenuto energetico	kg/t	1.190	9,81	1.180	0,396
Argilla	kg/t	1.070	0,114	1.070	0,0133
Sabbia	kg/t	113	7,87	105	0,242
Con contenuto energetico	MJ/t	4.980	4.510	158	315
<b>Rinnovabili</b>					
Senza contenuto energetico	kg/t	2.134	839	1.162	135
di cui acqua per la produzione del coppo	kg/t	48,6	48,6	-	-
Con contenuto energetico	MJ/t	105,6	101,8	2,98	0,9
+ acqua per la produzione energetica	kg/t	4,33E+05	4,12E+05	1,68E+04	5,07E+03
<b>Consumo elettricità</b>	<b>MJ/t</b>	<b>307,6</b>	<b>306</b>	<b>1,6</b>	<b>0,0</b>

			Fase Produzione		Fase d'Uso
Categoria di impatto	U.M.	Totale	Produzione coppo	Estrazione ma- terie prime	Distribuzione
Acidifying compounds	kmolH+/t	0,0374	0,0306	0,0023	0,0044
Eutrophication compounds	kg O2/t	4,13	2,48	0,56	1,09
Greenhouse gases	kg CO2/t	515,2	477	11,9	26,3
Ozone depleting gases	kg CFC11/t	5,00E-05	4,60E-05	2,00E-06	2,00E-06
Photochemical ozone creation	kg C2H4/t	6,51E-03	5,51E-03	3,40E-04	6,60E-04

Fig. 2-6: Stralcio dei dati ambientali riportati nell'Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD®) del coppo in cotto, Vs 0.0 del 03.01.07, Cotto San Michele Srl (Fonte: EPD, Environdec, Svezia)

Raw material provision, production up to the factory gates		Unit per kg			
Evaluation dimension		StoIt	StoSilo	StoSil	StoLotusan
Primary energy requirement, non-renewable [MJ]	7,41E+00	8,21E+00	5,10E+00	1,05E+01	
Primary energy requirement, renewable [MJ]	1,33E+00	1,22E+00	4,46E-01	2,31E+00	
Abiotic depletion potential (ADP) [kg Sb equiv.]	3,01E-03	3,33E-03	2,08E-03	4,10E-03	
Global warming potential (GWP 100) [kg carbon]	2,35E-01	2,65E-01	1,89E-01	3,79E-01	
Ozone depletion potential (ODP) [kg R11 equiv.]	3,76E-07	3,43E-07	1,64E-07	5,05E-07	
Acidification potential (AP) [kg SO2 equiv.]	1,47E-03	1,61E-03	1,31E-03	2,39E-03	
Eutrophication potential (EP) [kg PO4 equiv.]	7,99E-04	8,06E-04	9,44E-04	1,22E-03	
Photochemical ozone creation potential (POCP)	2,55E-04	2,60E-04	1,75E-04	2,93E-04	
Raw material provision, production, utilisation and disposal		Unit per kg			
Evaluation dimension		StoIt	StoSilo	StoSil	StoLotusan
Primary energy requirement, non-renewable [MJ]	7,79E+00	8,59E+00	5,48E+00	1,08E+01	
Primary energy requirement, renewable [MJ]	1,33E+00	1,22E+00	4,46E-01	2,31E+00	
Abiotic depletion potential (ADP) [kg Sb equiv.]	3,18E-03	3,50E-03	2,25E-03	4,28E-03	
Global warming potential (GWP 100) [kg carbon]	2,63E-01	2,93E-01	2,17E-01	4,07E-01	
Ozone depletion potential (ODP) [kg R11 equiv.]	3,76E-07	3,43E-07	1,64E-07	5,05E-07	
Acidification potential (AP) [kg SO2 equiv.]	1,78E-03	1,92E-03	1,62E-03	2,71E-03	
Eutrophication potential (EP) [kg PO4 equiv.]	8,38E-04	8,45E-04	9,83E-04	1,26E-03	
Photochemical ozone creation potential (POCP)	2,88E-04	2,93E-04	2,08E-04	3,26E-04	

Fig. 2-7: Stralci con la visualizzazione dei dati ambientali riportati nell' "Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025" Exterior plaster (organic) Sto Aktiengesellschaft Declaration number EPD-STO-2011331-E, intonaco esterno (Fonte: Institut Bauen und Umwelt e.V., Germania)

Nel contesto del settore edilizio l'elaborazione e la ricostruzione dei processi per la produzione di prodotti e componenti, per disporre di dati ambientali primari, non è competenza degli attori del settore, a maggior ragione del progettista. Servono le competenze esperte, più propriamente individuabili in figure specializzate in ingegneria ambientale, gestionale, chimica e biologia, in grado di estrapolare nel dettaglio le sostanze e la loro composizione fisica e chimica. Nell'applicazione della metodologia LCA a ridosso della fase progettuale dell'architettura, al progettista utilizzatore serve poter disporre dei dati del profilo ambientale dei materiali e dei componenti edilizi già confezionati (tipicamente di dispone di dati relativi al kg di materiale o al mq di componente), al fine di poter effettuare analisi LCA comparative alla scala del sistema costruttivo o dell'edificio. Tuttavia la figura dell'architetto progettista o dell'esperto ricercatore della progettazione dell'edificio e delle tecnologie costruttive si è configurata una competenza indispensabile nei tavoli di lavoro e di ricerca riguardo alla declinazione della LCA per la valutazione degli impatti ambientali dell'edificio e dei sistemi costruttivi, insieme alle altre competenze strettamente legate alla strutturazione pura e scientifica della metodologia e dei processi produttivi per le voci da inserire nelle banche dati. La competenza dell'operatore del settore consente di far emergere le peculiarità proprie dell'edificio e delle fasi del ciclo di vita rispetto ad altri organismi o prodotti di consumo, di individuare gli indicatori ambientali specifici o prioritari rispetto alle specifiche relazioni tra l'edificio e l'ambiente. Ogni architettura è unica e irripetibile, soprattutto sono univoche le relazioni con il contesto e con gli utenti che la utilizzano, per cui la valutazione LCA necessita di specificità d'uso rispetto alla sua applicazione in altri settori produttivi, in cui il prodotto in serie ha caratteristiche non equiparabili all'edificio.

La criticità nell'affrontare con approccio scientifico un'analisi del ciclo di vita in edilizia emerge nella difficoltà ad accedere a informazioni primarie sui processi delle filiere produttive di un componente (che constano nel reperimento delle materie prime, nel trasporto delle stesse al sito produttivo, nelle fasi di semilavorazione, fino al confezionamento per il trasporto al cantiere).

Attualmente si ricorre a banche dati, quindi a valori medi di impatto ambientale relativi ai campionamenti rilevati su più aziende dello stesso settore merceologico. Tuttavia, rispetto a voci di banche dati generali, solo un'analisi accurata dei processi di produzione, costruzione e uso permetterebbero di evitare congetture speculative e informazioni casuali.

Il progettista ha la necessità di attingere ai dati (primari o secondari) come condizione necessaria per poter impostare la valutazione LCA e, in effetti, si trova ad affrontare una certa frammentarietà dei dati. Se i dati primari sono spesso di difficile reperimento o ricostruzione, è necessario affidarsi a banche dati: questo implica considerare valori medi e, come ulteriore penalizzazione, fare riferimento a contesti produttivi presumibilmente anche molto discostati rispetto a quello considerato. I dati potrebbero non essere totalmente pertinenti in valutazioni di edifici costruiti nel nostro territorio. Va tuttavia constatato come la gamma di materiali edilizi presenti sul mercato italiano non sia così facilmente circoscrivibile alla produzione industriale edilizia nazionale: spesso si fa riferimento a prodotti che vengono confezionati all'estero e sono messi in opera in Italia. Tale frammentarietà rappresenta un ostacolo difficilmente sormontabile per una diffusione su larga scala della valutazione LCA nel comparto delle costruzioni in Italia in particolare: non esiste una banca dati LCI di materiali e prodotti edilizi, basata su un sistema produttivo, di materiali, prodotti e mix energetico nazionale. Questo implica alcune considerazioni. Una riguarda la difficoltà di contestualizzare sul territorio nazionale l'analisi del ciclo di vita per valutazioni in termini

assoluti di organismi edilizi o dei sub sistemi e componenti. In secondo luogo emerge al carenza di soglie prestazionali di riferimento “contestualizzate”, ovvero scale di valutazione per cui valutare i casi di studio analizzati.

I valori di riferimento attinti da una banca dati sono da considerarsi comunque relativi: per esempio confrontando le energie incorporate (ovvero le energie spese per la produzione dal reperimento delle materiale prime all’imballaggio per il trasporto in cantiere) delle stesse voci di materiali, attingendo da diverse banche dati, con situazioni produttive localizzate in contesti nazionali diversi, si nota come ci siano degli scostamenti tra i numeri risultanti, dovuti principalmente alle specificità dei processi produttivi e dei mix energetici nazionali. Considerando, per esempio, il caso del laterizio e paragonando i dati relativi all’energia incorporata per la sua produzione, i valori difficilmente corrispondono:

Descrizione del materiale/strato	Voce da banca dati	EE [MJ/Kg]
<b>Voce da banca dati ICE 1.6a - UK</b>		
blocchi in laterizio	Clay general (Simple Baked Products)	3.00
<b>Voce da banca dati Ecoinvent - CH</b>		
blocchi in laterizio	Brick, at plant	2.64
<b>Voce da banca dati Idemat 2001 - NL</b>		
blocchi in laterizio	Ceramics I	3.84
<b>Voce da banca dati Itec database - ES</b>		
blocchi in laterizio	Ceràmica	2.32
<b>Voce da studio LCA su laterizi - Grecia</b>		
blocchi in laterizio	Bricks in Greece (Koroneos, Dompros, 2007)	3.47
<b>Voce da banca dati CES Edu Pack - UK</b>		
blocchi in laterizio	Brick (common)	2,2 ÷ 3,5
<b>Voce da banca dati GaBi - D</b>		
blocchi in laterizio	Brick	2.99
<b>Voce da banca dati Alcorn</b>		
blocchi in laterizio	Brick	2.70
<b>Voci da banca dati Protocollo Itaca - I</b>		
blocchi in laterizio	Laterizio forato	2,2 ÷ 2,94

Tab 2-2: Confronto fra differenti valori di energia incorporata per la produzione di 1 kg di laterizio secondo alcune fonti da letteratura e banche dati

Spesso i dati a letteratura presi a riferimento sono sicuramente penalizzanti rispetto a realtà produttive specifiche, poiché spesso sono risultati di medie tra diversi campionamenti produttivi. Per esempio alcuni studi condotti da produttori virtuosi sui prodotti in laterizio, riscontrabili nelle dichiarazioni EPD di prodotto, hanno rilevato valori di energia incorporata per un blocco di laterizio per chiusura verticale vicini a 1,5 MJ/kg, che, rispetto al dato di 3 MJ/kg tratto da letteratura e assunto nelle valutazioni seguenti, è sicuramente migliorativo.

Nella carenza di dati specifici o nazionali, a livello procedurale, vi sono alcune strade possibili da perseguire, specialmente se si tratta di analizzare materiali e componenti tradizionali, già ampiamente usati nella realizzazione degli edifici. Un approccio già perseguito ed adottato a livello internazionale è quello della regionalizzazione delle voci di banche dati straniere, secondo opportuni percorsi di contestualizzazione. Dal punto di vista operativo questo significa: a. una analisi comparativa delle stesse voci di processo attinte da differenti banche dati; b. la scelta della voce più rappresentativa rispetto al materiale

e/o prodotto per l'edilizia risultato della prassi produttiva italiana, nel caso nostro, o del contesto in oggetto; c. un approfondimento comparato dei processi produttivi del profilo ambientale da banca dati con quello del prodotto nazionale.; d. da ultimo l'applicazione di opportuni percorsi di contestualizzazione (variazione del mix energetico impiegato, modifica delle fasi del processo produttivo, modifica dei percorsi e mezzi di trasporto per la distribuzione/importazione, presa in considerazione di scenari di fine vita calibrati rispetto alla regolamentazione nazionale dei rifiuti per singole categorie merceologiche).

E' importante, in ogni caso e per tutte le valutazioni LCA che si intraprendono, impostare una procedura interna di qualificazione delle informazioni a disposizione, di chi effettua uno studio LCA. Prendendo in considerazione comunque il margine di incertezza che permea nelle banche dati, è inoltre fondamentale poter qualificare la rappresentatività del dato, la sua origine e tutti gli elementi necessari per una sua riproducibilità, sia nel caso in cui si abbiano a disposizione dati primari, sia nel caso in cui si attingano le informazioni da banche dati. In questo secondo caso è importante compiere una scelta oculata del processo produttivo medio da inserire nell'inventario. Esistono due percorsi possibili: uno è ricercare la voce relativa al prodotto, analizzarla, verificarne l'attinenza rispetto al contesto a cui si riferisce l'analisi, ed eventualmente se si dispone di alcuni dati primari, si può compiere, con grande ocularità, un'integrazione o una modifica dei dati; il secondo è generare una nuova voce specifica, a cui sono collegati i processi di semilavorazione, chiaramente già presenti in banca dati.

Se in una analisi del ciclo di vita di sistemi costruttivi o edifici si devono valutare prodotti innovativi e recenti sul mercato edilizio, non è sempre semplice capire come muoversi, al di là del pensare di raccogliere i dati primari o perlomeno i maggiori componenti (e le relative quantità) e, se possibile, adattare una voce da banca dati di un materiale o prodotto simile, definendo un nuovo processo per il materiale innovativo in oggetto. Per esempio, come vedremo di seguito (§ capitolo 5), se si deve valutare un'architettura che ha tra i componenti un sistema in etfe (un film fluoropolimerico trasparente usato in sistemi di involucro pneumatici), emerge l'assenza nelle banche dati della voce relativa a tale materiale. Si è proceduto esattamente come appena indicato: tramite reperimento della composizione chimica del film e dei quantitativi dei singoli componenti e andando a costruire una voce di processo ad hoc, partendo da un materiale simile, contemplato dalla banca dati. Ovviamente il risultato è passibile di approssimazione rispetto a una voce di database generata su misura rispetto al profilo produttivo di una azienda specifica o al valore medio calcolato rispetto a una rosa di produttori.

Altri esempi, come vedremo di seguito (§ capitolo 5), riguardano alcuni materiali non contemplati o comunque con filiere produttive o componenti leggermente diversi da quanto contenuto nelle banche dati, quali il fibrocemento per pannelli di facciata, il gasbeton per i blocchi dei paramenti murari d'involucro e la lana di vetro quale pannello di isolamento. Nel caso del fibrocemento si è creato un processo nuovo, conoscendo i quantitativi delle materie prime e confrontando processi simili. Per il gasbeton, ovvero il calcestruzzo cellulare, si è utilizzata da Ecoinvent la voce del processo *Autoclaved aerated concrete block, at plant, CH, [kg]*, in cui con completezza e rigoroso dettaglio sono riportate le informazioni riguardo i processi produttivi. Questo esempio offre l'occasione per sopra restituire alcune considerazioni sull'importanza di una scelta attenta delle voci di processo da database. In alcuni processi sono indicate sostanze in entrata e/o emissioni in uscita le cui quantità sono consistenti rispetto al totale in peso di tutti i componenti del mix-design del materiale;

indagando la fase di caratterizzazione successiva all'LCI e i fattori di conversione in essa contemplati, che permettono l'accorpamento di più sostanze dell'LCI in categorie di impatto con gli indicatori ambientali, emerge a volte come tali "consistenti" quantità (di sostanze in entrata e/o emissioni in uscita) non vengono proprio caratterizzate, e i fattori di conversione sono nulli. Ciò significa che la tabella delle sostanze contemplate in uno specifico metodo di valutazione (terza fase della metodologia LCA), per ognuna delle quali corrisponde un fattore di caratterizzazione, ometterle non contempla quelle sostanze nello specifico. Questo fattore non è di poco conto, ma l'informazione emergente corrisponde alla totale assenza nel processo di tali sostanze, che invece potrebbero essere causa di notevoli impatti ambientali. Nel caso specifico del processo per il calcestruzzo cellulare per la verifica degli aspetti appena esposti, si è approfondito l'impatto ambientale del sottoprocesso relativo alla produzione di calcare (*Limestone*), materia prima per la produzione di 2 Kg di calce, sostanza presente nel processo principale del gasbeton. Il confronto è stato fatto tra la voce *Limestone* da banca dati IVAM e da banca dati ETH: è emerso che la prima determina un maggiore impatto ambientale della seconda, scostamento presumibilmente imputabile a due differenti filiere produttive o a due contesti produttivi diversi<sup>3</sup>.

L'aspetto penalizzante dell'uso delle banche dati dipende in effetti dal fatto che i valori siano impostati su contesti produttivi e mix energetici presumibilmente lontani da quello di riferimento. Ne solo la dimostrazione alcuni confronti condotti su alcune voci attinte da banche dati, anche diverse, relative allo stesso materiale da costruzione. Alla lana di vetro (*glasswool*) come materiale isolante corrispondono più voci afferenti a banche dati diverse: per esempio *Glass, -fiber or -wool*, dalla banca dati IDEMAT, *Glasswool* e *Glasswool con borax*<sup>4</sup> dalla banca dati Ecoinvent. Per verificare la presenza di eventuali scostamenti sui risultati dell'analisi di impatto, si sono confrontati gli impatti ambientali dei tre processi comparando un kg (quale unità funzionale) di lana di vetro, con il metodo olandese Ecoindicator, considerando le fasi dal reperimento delle materie prime per la produzione e al confezionamento del prodotto finito. Si evince dai grafici come gli esiti siano diversi (fig. 2-2).

Da questo emerge come sia fondamentale la contestualizzazione del dato, la scelta consapevole della voce di processo e la restituzione chiara e trasparente nel commento

---

3. La seconda voce da ETH risulta essere meno trasparente della prima, poiché nel diagramma dei flussi riporta le singole sostanze chimiche in *inputs* e *outputs*, non esplicitando i processi intermedi della semilavorazione, tuttavia gli effetti di questi ultimi sono caratterizzati nelle fase di valutazione. La voce *Limestone* da ETH ha la sostanza "polveri" (*dust (coarse)process*) negli *outputs* (particolarmente dannosa alla salute umana, alla respirazione), in quantità pari a 161 mg/Kg di calce (16% del totale), che in seguito alla valutazione condotta con un metodo specifico, per esempio quello danese Edip96, risulta come assente: la voce *dust (coarse)* infatti è esclusa nell'insieme delle polveri contemplate dalla caratterizzazione del metodo. Pure la voce *Limestone* IVAM ha la voce polvere (*dust (coarse)*) tra gli *outputs*, tuttavia in quantità pari a 0,072 su un Kg di calce: il 7% del totale!

4. Tra le voci dei materiali di input nel processo *Glasswool*, viene indicata la presenza di un materiale, di cui si dice avere conoscenza, ma non si dispone dei dati (*material known, no data*). Ciò evidenzia la totale trasparenza delle banche dati, dei loro limiti e delle mancanze. Tuttavia, da informazioni ottenute da produttori del settore, si è voluta indagare la natura di tale materiale, per poter generare una nuova voce per la banca dati, completa. Il materiale non noto è il boro, quindi, prima di intraprendere un confronto degli impatti fra i vari tipi di *Glasswool*, si è costruita la voce della materia prima "Borax", il boro. La voce è stata ricavata dalla banca dati Ecoinvent, sotto il nome di "*borax, anhydrous, powder, at plant*" e si è ricostruito tutto il processo a monte, un'operazione questa estremamente operosa e complessa. Poi si è denominata una nuova voce "*Glasswool con borax*" e inserita nella banca dati del codice SimaPro. In tale voce è stato sostituito il "*material known, no data*", con il "*borax, anhydrous, powder, at plant*".

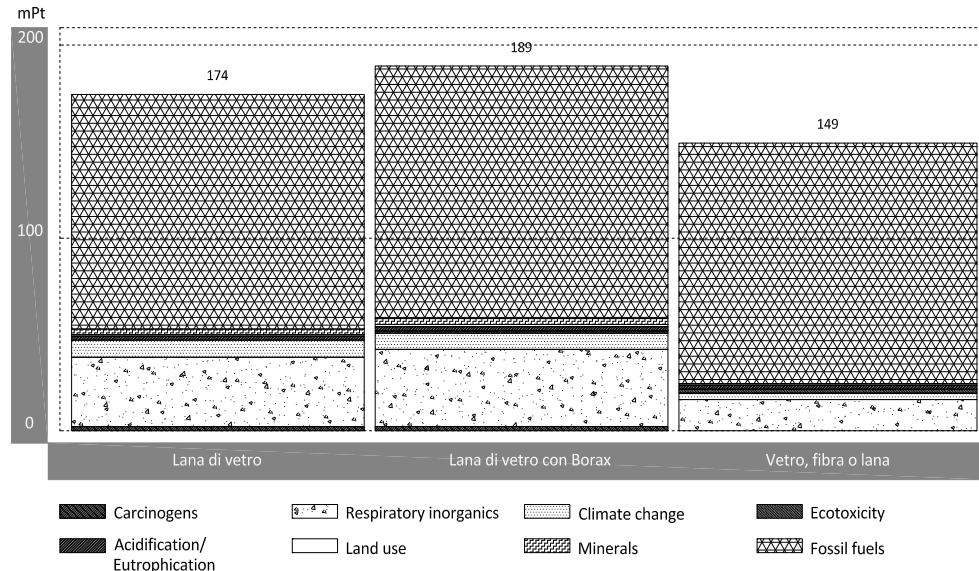


Fig. 2-8: Grafico di confronto tra alcune voci prese da banche dati diverse, tutte riferite alla produzione di un kg di lana di vetro. Tra le voci Glasswool con borax e Glasswool ci sia una differenza sul risultato del 8%; tra la seconda e la terza voce un margine del 21% e tra la prima e la terza un impatto differente per il 14%. L'incidenza degli impatti è attribuibile all'uso di combustibili fossili (colore viola) all'emissione di sostanze dannose alla salute umana, nella categoria Respiratory inorganics (colore rosso) (elaborazione da risultati ottenuti dal software Sima Pro).

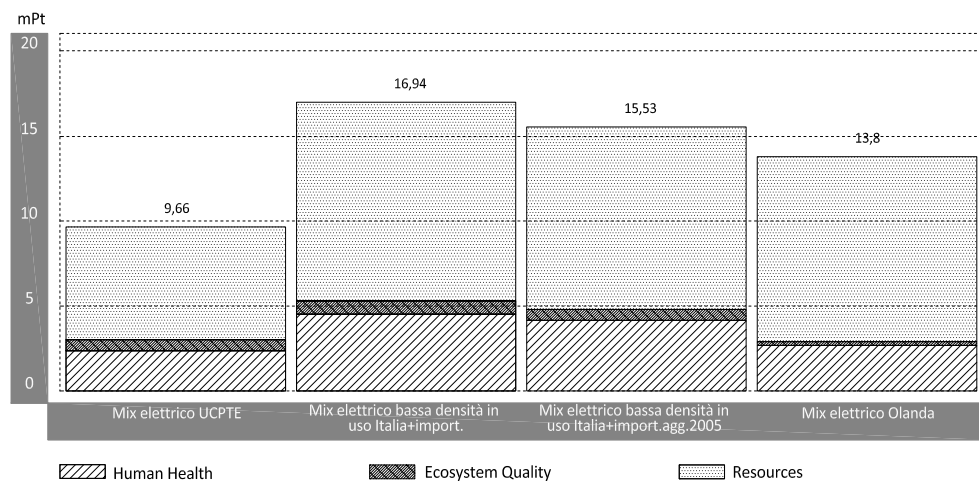


Fig. 2-9: Grafico di confronto tra alcuni mix energetici contenuti nelle banche dati del codice SimaPro, presi come campione. La dimostrazione mette in luce come gli esiti di una valutazione degli impatti ambientali sia fortemente collegata al vettore energetico nazionale o locale, quindi dipendente dalla localizzazione dell'insediamento produttivo (elaborazione da risultati ottenuti dal software Sima Pro).

della procedura seguita; altrimenti valori diversi possono ripercuotersi sugli esiti di una valutazione dell'impatto ambientale di un edificio, in cui la lana di vetro viene impiegata nei pannelli per l'isolamento.

Altro aspetto determinante sui risultati di una valutazione è l'energia, o meglio il vettore energetico impiegato da ogni nazione per alimentare i processi produttivi, per generare l'energia elettrica e la climatizzazione degli ambienti. L'energia è un fattore fortemente dipendente dal contesto in cui si inserisce la filiera da valutare, per cui uno stesso prodotto generato in luoghi diversi determinerà un impatto ambientale diverso. Lo dimostra il confronto effettuato con il metodo olandese Ecoindicator99 sui mix energetici di alcuni ambiti nazionali diversi, presi come campioni: - *Electricity UCPT* (mix energetico dei paesi dell'unione europea<sup>5</sup>), - *Electricity Holland B* (mix energetico olandese), - *Electricity LV use in I + imports* (mix energetico italiano contenente le quote di importazione e aggiornato al 2000), - *Electricity LV use in I + imports* (2005) (mix energetico italiano contenente le quote di importazione e aggiornato al 2005). L'unità funzionale del confronto è 1000 GJ di energia elettrica prodotta e il confine del sistema di questa analisi LCA è la fase produttiva dell'energia (dal reperimento e ricerca delle risorse, all'ottenimento del Joule come potenza elettrica e al trasporto di tale energia; si esclude il sistema di distribuzione). Le differenze fra i mix consentono di sottolineare ulteriormente l'esigenza di disporre di una base comune, con un'uniformità di dati, per rendere confrontabili gli esiti delle valutazioni ambientali. (fig. 2-4) Il mix energetico italiano da banca dati risulta essere più impattante di quello modificato su dati aggiornati. E' anche vero che la banca dati è leggermente datata, e nel corso degli ultimi anni la realtà energetica è cambiata. Le differenze fra i mix fanno capire ancor di più l'esigenza di poter svolgere delle valutazioni con un'uniformità di dati.

---

5. L'elettricità UCPT è riferita al mix, nato dopo la liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica. UCPT è l'acronimo dell'Unione per la Coordinazione della Produzione e del Trasporto dell'Elettricità.



[illegible]

Tab. 2-3: Descrizione dei processi di produzione di due voci da banca dati per il materiale "Lana di vetro" (Fonte: elaborazione da banche dati di SimaPro).

## 2.2. La caratterizzazione degli impatti ambientali del sistema edificio

Ai fini della valutazione degli impatti ambientali (*Life Cycle Impact Assessment* ISO 14042:2000) si fa affidamento a indicatori aggregati di uso internazionale che consentono di quantificare gli impatti e confrontare le eventuali alternative di processo o di prodotto. La terza fase della valutazione si suddivide in quattro sotto fasi di:

- *classificazione* delle sostanze emesse in ordine di rilevanza degli impatti, ovvero la fase in cui i dati raccolti precedentemente nell'inventario vengono suddivisi in gruppi di temi o categorie di impatti ambientali (*impact categories*) riconducibili a tre grandi aree di protezione generale dell'equilibrio uomo - ambiente (esaurimento delle risorse, salute umana, conservazione dell'ambiente); alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto ambientale, si ottiene la corrispondenza tra i dati sul ciclo di vita del materiale e gli impatti associabili ad esso mediante tabelle di veloce lettura. La stessa sostanza o materiale può essere contenuta all'interno di più categorie di impatto.
- *caratterizzazione* di tali sostanze in diverse categorie di danno, a seconda degli effetti che provocano, che consente di individuare e pesare all'interno di una singola categoria di impatto il tipo di danno relativo alla sostanza emessa o alla risorsa usata;
- *normalizzazione* degli impatti caratterizzati, attraverso un accorpamento delle sostanze in macro-categorie di danno, che consente un confronto più immediato dei valori di danno di differenti categorie di danno, con diverse unità di misura;
- *valutazione*, che attribuisce un valore, in termini di importanza, a ciascun impatto tramite un indice complessivo (accorpando diversi valori in un punteggio singolo finale).

Il livello di dettaglio, la scelta degli impatti sui quali soffermarsi maggiormente e le metodologie da utilizzare dipendono dall'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio. Il procedimento per questo tipo di elaborazione risulta piuttosto complesso e prescinde da un primo momento di definizione degli indicatori di impatto ambientale e delle categorie di impatto. Secondo Tiezzi, Pulselli, Nicolucci (2010) un indicatore per essere definito un valido indicatore di sostenibilità dovrebbe possedere i seguenti requisiti: - essere basato su solidi fondamenti scientifici, sempre più riconosciuti dalla comunità scientifica; - essere rilevante, cioè deve raccogliere in sé tutti gli aspetti della sostenibilità e tutti i livelli (sia globale che locale, non solo quest'ultimo); - essere trasparente, cioè possono anche essere complessi ma la loro comunicazione e il loro significato devono essere chiari anche a non esperti; - essere quantificabile, cioè gli organismi che si occupano di statistica devono fare tutto quello che è possibile per raccogliere i dati necessari per una propria diagnosi del livello di sostenibilità.

In generale si procede con l'identificazione delle tipologie di impatto ambientale indagate dal sistema da valutare. Nella definizione delle categorie considerate, la norma ISO 14042 (2000) prevede il rispetto di alcune caratteristiche:

- la completezza, per cui è necessario comprendere tutte le categorie di impatto che, a breve o lungo termine, possono essere influenzate dal sistema;
- l'indipendenza tra categorie di impatto, al fine di evitare l'intersezione tra più categorie, motivo di confusione;
- la praticità, ovvero la lista di categorie formulata non dovrebbe spingersi a un dettaglio troppo elevato, contemplando un numero eccessivo di categorie.

Per la scelta delle categorie di impatto, è considerato completo e attendibile il documento elaborato dalla SETAC, *Working Group on LCIA*, relativo alle tipologie di impatto ambientale relativo alle attività antropiche:

- *Impoverimento di risorse abiotiche*, per cui si considerano le estrazioni di risorse naturali quali: - l'utilizzo di risorse naturali non rinnovabili, considerate limitate - non rigenerabili in brevi periodi di tempo (combustibili fossili e minerali), - l'uso di risorse materiali (acque sotterranee, sabbia, ghiaia) e di risorse rinnovabili (acque superficiali, energia solare, vento, correnti oceaniche).  
La quantificazione elaborata è:  $W_j = G_j/R_j$   
con:  $G_j$  Consumo corrente globale del minerale [ $m^3$ ]  
 $R_j$  Riserva del minerale [ $m^3$ ]
- *Impoverimento di risorse biotiche*, per cui si considera l'impoverimento di tipologie specifiche di biomassa, come il legname, raccolte sia in maniera sostenibile, sia in maniera non sostenibile (un esempio è la deforestazione indiscriminata delle foreste tropicali, dove il ritmo d'estrazione del legno è troppo veloce rispetto al ciclo di crescita di nuove piante). Non è ancora stata fatta una determinazione attendibile: si potrebbe definire un indicatore basato sulla rarità (dimensione dello stock) e sul tasso di rigenerazione della risorsa.
- *Uso del territorio*, in cui si considera la riduzione del suolo disponibile per lo sviluppo di specie animali e vegetali.
- *Effetto serra*, che consiste nell'aumento della temperatura nella bassa atmosfera come conseguenza all'aumento della presenza di alcuni gas come la  $CO_2$ , il metano, il biossido di azoto, i quali contribuiscono alla permanenza nell'atmosfera delle radiazioni infrarosse. Per la quantificazione viene usato il Parametro Potenziale di Riscaldamento Globale (*Global Warming Potential, GWP*). Esso definisce la potenziale influenza di una sostanza, valutata in termini relativi rispetto alla  $CO_2$ , secondo orizzonti temporali di 20, 100, e 500 anni. I dati sono sviluppati dall'*Intergovernmental Panel on Climatic Change*.
- *Produzione di rifiuti solidi*, in cui si computano e valutano i rifiuti emessi dai processi coinvolti nel sistema, in quanto potenzialmente impattanti per l'ambiente. Devono essere considerati sia gli effetti propri del tipo di rifiuto, che i processi necessari allo smaltimento.
- *Impoverimento dell'ozono stratosferico*, il cosiddetto "buco nell'ozono", che contribuisce all'incremento dell'incidenza dei raggi ultravioletti, dannosi per l'uomo e per l'ecosistema in generale. Il parametro di quantificazione di impatto è il Potenziale di Riduzione dell'ozono stratosferico (*Ozone Depletion Potential, ODP*), e la sostanza alla quale si rendono omogenee le altre influenti è il  $CFC_{11}$ .
- *Ecotossicità*, in cui vengono considerate le emissioni dirette di sostanze tossiche che provocano danni alle specie animali e vegetali e agli ecosistemi: metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi, sostanze derivanti da degradazione di prodotti; sono oggetto di studio anche le emissioni di sostanze chimiche o biologiche che provocano danni di salute all'uomo. Sono stati adottati i seguenti parametri: ECA (*Aquatic Ecotoxicity*) [ $m^3/kg$ ], per la valutazione di tossicità delle acque; ECT (*Terrestrial Ecotoxicity*) [ $m^3/kg$ ], per la valutazione della tossicità del terreno. Ma per semplificazione di solito si usa solamente il primo, poiché la maggior parte delle emissioni nel terreno contamina anche le falde acquifere.

- *Tossicità per l'uomo*, in cui vengono considerate le emissioni di sostanze chimiche o biologiche che provocano danni di salute all'uomo. I parametri sono HCA (*Human toxicological Classification value for Air*), per le emissioni aeree, HCW (*Human toxicological Classification value for Water*), per le sostanze emesse in acqua, HCS (*Human toxicological Classification value for Soil*), per le sostanze emesse nel terreno.
- *Acidificazione*, in cui si valuta il rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, normalmente attraverso la pioggia. Gli effetti si manifestano con crescita insufficiente di legname nelle foreste di legno dolce (come l'abete rosso), particolarmente presente nella penisola scandinava e in Europa centrale. Gli effetti sull'ecosistema acquatico sono dovuti all'abbassamento del PH delle acque, effetto deleterio per la conservazione della vita. La manifestazione più evidente di questo processo è l'erosione di pietre calcaree a rivestimento di edifici o in altre forme. Il parametro studiato è il fattore Potenziale di Acidificazione (*Acidification Potential, AP*), stimato in termini di  $\text{SO}_2$  o mole di  $\text{H}^+$ .
- *Arricchimento in nutrienti*, che consiste in un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili, con un conseguente incremento della quantità di plancton, alghe e piante acquatiche in generale. L'eccesso di quantità di queste forme di vita causa deterioramento della qualità e riduzione della loro possibilità di utilizzo.

Nella fase di caratterizzazione diventa cruciale la quantificazione dell'impatto generato dall'oggetto analizzato. I dati presenti nell'inventario, e facenti parte di tipologie di impatto classificate precedentemente, vengono convertiti, attraverso una serie di calcoli, in contributo relativo di ogni singola sostanza emessa o risorsa utilizzata. In sintesi, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, ed è stabilito da un'autorità sulla base di considerazioni di carattere puramente scientifico. L'operazione viene effettuata moltiplicando le quantità delle sostanze emesse o consumate nel processo per i relativi fattori di caratterizzazione (*weight factors*), propri della categoria di impatto. Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale del prodotto. Esso è costituito da una serie di punteggi relativi all'impatto in ciascuna categoria di danno. Viene rappresentato graficamente attraverso degli istogrammi. Nella normalizzazione, i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono "normalizzati", ovvero comparati a valori di riferimento – o effetti normali – rappresentati dai dati medi elaborati su scala mondiale, regionale o europea, e riferiti ad un determinato periodo di tempo. Attraverso la normalizzazione è possibile quindi stabilire l'intensità dell'impatto ambientale del sistema studiato rispetto alla media dell'impatto generato dall'uomo nell'area geografica prescelta come riferimento, quindi con una contestualizzazione del dato. Un'analisi più dettagliata in genere richiede che l'area di riferimento sia piuttosto ristretta. Questa fase non è sempre strettamente necessaria per un'analisi LCA completa, serve semplicemente a paragonare l'oggetto di analisi alla media degli impatti già presenti. Nell'ambito edilizio si individuano caratteristiche e categorie specifiche al settore. Per esempio per quanto riguarda il consumo di risorse vanno quantificate e valutate l'energia incorporata, l'acqua incorporata, il riciclo di materia, la recuperabilità di componenti e materiali; per i carichi ambientali lo smaltimento o la biodegradabilità degli scarti durante la filiera o a fine vita, la durabilità di materiali e componenti, la durata di sistemi costruttivi e dell'edificio, la resistenza e la stabilità; per l'impatto sulla salute (anche nella fase d'uso) vanno valutate le emissioni di VOC, le sostanze tossiche, l'eventuale radioattività, l'impatto acustico, la qualità dell'aria interna agli ambienti.

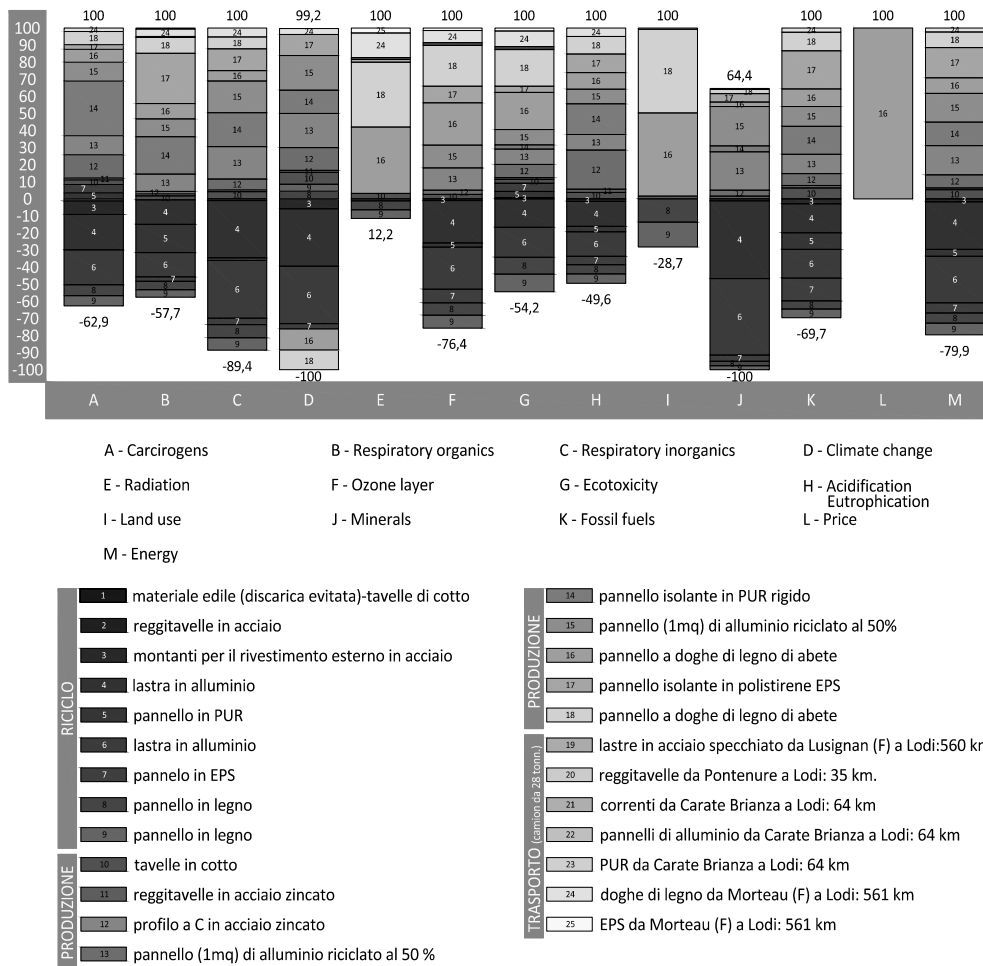


Fig. 2-10: Esempio di grafico della caratterizzazione dei danni ambientali di una valutazione LCA di un sistema di involucro, in cui si visualizzano in una scala % i contributi agli impatti ambientali, suddivisi per categorie di impatti, dei componenti dell'involucro (elaborazione da risultati ottenuti dal software Sima Pro)

TEMI AMBIENTALI	UNITA'	VALORI MONDIALI
<b>Esaurimento fonti energetiche</b>	$\text{GJ} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	235
<b>Effetto serra</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	37.7
<b>Ossidanti fotochimici</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	3.74
<b>Acidificazione</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	286
<b>Tossicità umana</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	576
<b>Ecotossicità dell'acqua</b>	$\text{m}^3 \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	1160
<b>Ecotossicità del suolo</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	1160
<b>Eutrofizzazione</b>	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	74.8

Tab. 2-4: Tabella con valori di impatto medi relativi ad un anno di produzione industriale a livello globale (Fonte: Monticelli, 2006).

Nel settore delle costruzioni la norma EN 15804:2012 nella parte relativa alle regole per la valutazione di impatto nell'analisi del ciclo di vita contempla gli indicatori ambientali per la Life Cycle Assessment dei prodotti edili e degli edifici classificandoli come segue:

- a. Indicatori di Impatto Ambientale
  - *Global warming potential (GWP)* – Potenziale di surriscaldamento del globo
  - *Depletion potential of the stratospheric ozone layer (ODP)* – Assottigliamento potenziale dello strato di ozono stratosferico
  - *Acidification potential of land and water (AP)* – Potenziale di acidificazione di suolo e acqua
  - *Eutrophication potential (EP)* – Potenziale di eutrofizzazione
  - *Summersmog potential (POCP)* – Potenziale di formazione dello smog estivo
  - *Abiotic depletion of non fossil resources (ADP elements)* – Riduzione abiotica delle risorse non fossili
  - *Abiotic depletion of fossil resources (ADP fossil fuels)* - Riduzione abiotica delle risorse fossili
- b. Indicatori Energetici
  - *Non renewable primary energy, excluding feedstock* – Energia primaria non rinnovabile, esclusi i feedstock
  - *Input of non renewable feedstock* – Immissione di feedstock non rinnovabile
  - *Total input of non renewable primary energy* – Totale delle immissioni di energia primaria non rinnovabile
  - *Renewable primary energy, excluding feedstock* – Energia primaria rinnovabile, esclusi i feedstock
  - *Input of renewable feedstock* – Immissione di feedstock rinnovabile
  - *Total input of renewable primary energy* – Totale delle immissioni di energia primaria rinnovabile
- c. Indicatori dell'acqua
  - *Input of net fresh water* – Immissione di acqua fresca e pulita

- d. Uso di materiali riciclati
  - *Input of secondary material* – Immissione di materiali secondari
  - *Input of renewable secondary fuels* – Immissione di combustibili secondari rinnovabili
  - *Input of non renewable secondary fuels* – Immissione di combustibili secondari non rinnovabili
- e. Indicatori dei rifiuti
  - *Hazardous waste disposed* – Raccolta di rifiuti pericolosi
  - *Non hazardous waste disposed* – Raccolta di rifiuti non pericolosi
  - *Radioactive waste disposed* – Raccolta di rifiuti radioattivi
- f. Materiali esportati dal ciclo di vita considerato
  - *Components for re-use* – Componenti per il riuso
  - *Materials for recycling* – Materiali per il riciclo
  - *Materials for energy recovery* – Materiali per il recupero del vettore energetico
  - *Exported energy* – energia esportata.

In generale gli indicatori creati negli ultimi anni sono stati molti e la comunità scientifica è ancora lontana dal trovare un accordo internazionale su quali siano gli indicatori più corretti da utilizzare. Alcuni fra gli approcci più interessanti al problema della sostenibilità sono scaturiti da ragionamenti teorici di carattere generale sui sistemi, da cui, mediante assunzioni e semplificazioni, sono stati dedotti degli indicatori. I problemi da risolvere nella costruzione e selezione degli indicatori di sostenibilità riguardano la loro rilevanza, il tipo (analitico o sintetico) e il loro vero significato, ovvero la coerenza fra indicatore e “indicandum”.

Nel mondo della progettazione architettonica e nel settore edilizio inoltre ulteriore criticità sulla caratterizzazione rispetto a indicatori da definirsi è correlata alla difficoltà di rendere facilmente comprensibili gli esiti numerici, e le relative unità di misura, anche a non addetti alla disciplina specialistica della LCA. Tuttavia non è nemmeno corretto ricorrere a visualizzazione o interpretazione semplificata o “*user friendly*” degli indicatori o a evitare di contemplare tutti gli indicatori per ovviare alla complessità di alcuni parametri, spesso riferiti a problematiche ambientali molto specialistiche di discipline lontane dall’architettura. Inoltre, privilegiando in origine metodi a indicatori ambientali sintetici LCA, che hanno un fondamento nelle indicazioni normative e nelle politiche ambientali europee, rispetto a sistemi multicriterio a punteggio, basate su percorso volontario e proposte da organizzazioni non governative no-profit, si rileva come sia in atto un graduale sensibilizzazione agli indicatori nel settore delle costruzioni. Molte valutazioni di impatto ambientale di edifici e sistemi costruttivi utilizzano un approccio semplificato al metodo Lca, considerando, per esempio, esclusivamente l’indicatore “consumo di energia” o “potenziale di effetto serra” con le emissioni di anidride carbonica (*Global Warming Potential* o, in altre nomenclature, *carbon footprint* o *embodied carbon*) poiché sono gli indicatori più facilmente comprensibili e che consentono più facili comparazioni fra gli impatti delle fasi del ciclo di vita. Il “consumo di energia” contempla, da un lato, l’energia incorporata (*embodied energy*), ovvero l’energia non rinnovabile spesa nella fase di costruzione (per i materiali e i componenti) e nella fase di manutenzione (per l’inserimento di nuovi materiali e componenti in sostituzione di quelli obsoleti in fase d’uso) e dall’altro l’energia non rinnovabile consumata per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti dell’edificio analizzato nella fase d’uso.

Il *Global Warming Potential* o il *Carbon Footprint* è un termine entrato prepotentemente nel nostro vocabolario grazie alla sua stretta attinenza alle tematiche sui cambiamenti

climatici e sull'assegnazione delle varie responsabilità, e entrato nelle conoscenze dei processi progettuali e costruttivi grazie alla conoscenza del termine e dell'indicatore di emissioni di CO<sub>2</sub> precedentemente e ampiamente utilizzato per altri prodotti di consumo, quali per esempio i mezzi di trasporto con i loro consumi e emissioni. A tutt'oggi non esiste né una definizione univoca di *embodied carbon* né una metodologia standardizzata del suo calcolo. Una definizione più comunemente associata a questo indicatore dice che l'*embodied carbon* (unità di misura kgCO<sub>2</sub>eq.) esprime una misura dell'impatto che le attività umane hanno sull'ambiente in termini emissioni di gas serra prodotte nel ciclo di vita di un prodotto o di un servizio (Tiezzi, Pulselli, Nicolucci. 2010). Le emissioni di gas serra comprendono la contabilizzazione di tutti i gas ad effetto serra diretto o indiretto, a prescindere che abbiano o meno un contenuto in carbonio. Tutte le emissioni dei vari gas ad effetto serra sono ricondotte al potere climalterante dell'anidride carbonica attraverso opportuni coefficienti detti *global warming potentials* (IPCC, 2009) che tengono conto sia del tempo di vita di una molecola in atmosfera che del relativo potere climalterante.

Le diverse forme di uso delle risorse e energie e di emissioni inquinanti tipicamente hanno diversi potenziali di impatto ambientale all'interno delle cosiddette categorie di impatto. I potenziali di impatto ambientale sono descrivibili sulla base delle emissioni inquinanti, che vengono convertite tramite i cosiddetti "fattori di caratterizzazione" e accorpati insieme. Riguardo ai fattori di caratterizzazione la norma ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures (UNI EN ISO 14025:2010 in versione italiana), che stabilisce i principi e specifica le procedure, secondo la serie di norme ISO 14040, per lo sviluppo di programmi di dichiarazione ambientale di tipo III e le dichiarazioni ambientali Tipo III ed è la base dei principi per la complementare norma ISO 21930:2007<sup>6</sup>, dettaglia nella tabella 1 dell'Appendice A i fattori di caratterizzazione degli impatti da individuare per un prodotto, oggetto di dichiarazione ambientale. Da un confronto approfondito, i fattori di caratterizzazione, che misurano l'intensità dell'effetto della sostanza sul problema ambientale considerato, per gli indicatori ambientali *Global Warming Potentials*, *Ozone Depletion Potentials*, *Acidification*, *Photochemical Ozone Creation Potentials*, *Eutrophication* risultano essere gli stessi con cui si imposta la caratterizzazione in alcuni metodi di valutazione per la pesatura degli impatti sviluppati da diverse nazioni europee, come per esempio il Edip96, Edip2003 e Impact 2002+.

Esemplificando: nel metodo Edip96, che ricalca esattamente l'impostazione contemplata dalla norma ISO 14045 e si rifà ai fattori di caratterizzazione esposti nel 2000 nella antecedente bozza alla norma, la ISO TR 14025, il fattore di caratterizzazione per le emissioni di anidride carbonica è pari a 1, ovvero se l'emissione di CO<sub>2</sub> da un processo equivale a 4 grammi, nella categoria di impatto ambientale del *Global Warming Potential*, e il valore della caratterizzazione per la CO<sub>2</sub> espressa in grammi equivalenti di CO<sub>2</sub> è  $fc = 1 \text{ grCO}_2\text{eq}$ , l'impatto nell'indicatore GWP è pari a 4 grCO<sub>2</sub>eq. Sempre nella tabella si nota come il fattore di caratterizzazione per le emissioni di biossido di azoto N<sub>2</sub>O è pari a 310, quindi considerato

---

6. La ISO 21930 è uno Standard Internazionale che in accordo con i principi della ISO 14025 "Dichiarazioni ambientali di Tipo III" e della ISO/DIS 15392 "General Principles", ha lo scopo di descrivere i principi, i requisiti e la struttura della dichiarazione ambientale di Tipo III dei prodotti da costruzione al fine di dare uniformità dei mezzi, delle modalità e di garantire la trasparenza, la coerenza e la solidità scientifica della metodologia con cui si giunge alla dichiarazione ambientale dei prodotti da costruzione.



con un livello di gravità maggiore rispetto all'emissione di  $\text{CO}_2$ ; di conseguenza l'emissione di un solo grammo di  $\text{N}_2\text{O}$  è con un valore di caratterizzazione  $fc = 310 \text{ grCO}_2\text{eq}$ , l'impatto nell'indicatore GWP è pari a  $310 \text{ grCO}_2\text{eq}$ .

Nel settore specifico della progettazione degli edifici non è importante sapere tutti i passaggi che stanno dietro a metodi e indicatori, effettivamente di difficile comprensione e apparentemente estranea, è importante inquadrare le problematiche e conoscere l'ambito scientifico a cui i risultati di una valutazione LCA di componenti, sistemi costruttivi o edifici fanno riferimento. L'uso di strumenti di calcolo per elaborare l'inventario dei dati di input e il computo di tutti i materiali e componenti che costituiscono l'edificio consente di oltrepassare tutti i passaggi procedurali; quello che il progettista riceve dai calcoli è un risultato numerico, rispetto all'indicatore ambientale, equivalente all'ammontare dell'impatto ambientale del sistema analizzato.

L'esplicitazione del quadro metodologico vuole essere dimostrare come, dietro ai risultati ottenuti, la metodologia faccia riferimento a procedure chiare e su basi scientifiche condivise.

L'apparente complessità non deve scoraggiare l'utilizzatore della LCA, anzi deve rinforzare la volontà a non scendere a compromessi di semplificazione, ma a fare lo sforzo di ricercare gli strumenti di supporto decisionale attendibili, trasparenti e oggettivamente leggibili e basati su quantità numeriche.

### **2.3. I metodi di valutazione per la pesatura del danno ambientale**

I metodi di valutazione degli impatti consistono in processi tecnico-quantitativi e/o qualitativi tesi ad individuare, classificare e caratterizzare gli effetti indotti dall'azione antropica sul consumo di risorse, sulla conservazione dell'ambiente e sulla salute umana. Valutare gli impatti è un compito tutt'altro che semplice, specialmente in relazione alle conseguenze delle emissioni nell'ambiente, a causa dei problemi oggettivi di individuazione e interpretazione scientifica delle correlazioni fra queste e gli effetti ambientali.

La fase di valutazione degli impatti ambientali costituisce la quarta sottofase della fase di valutazione, è il momento dell'analisi LCA in cui vengono aggregati gli impatti per classi omogenee e organizzati in ordine gerarchico, con un'interpretazione dei dati fino a giungere a un punteggio aggregato finale in punti e quindi con una pesatura del danno di un prodotto rispetto da un altro. I valori degli effetti sul danno ambientale vengono moltiplicati per i "fattori peso", ovvero coefficienti che esprimono l'importanza relativa attribuita alle differenti tipologie di impatto, a seconda della criticità sull'ambiente. Una volta determinato il modello e i valori dei coefficienti da utilizzare, i diversi impatti relativi all'oggetto vengono sommati, per arrivare ad un unico valore adimensionale, l'eco-indicatore o indice ambientale finale, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto.

Nella fase di valutazione, le due sottofasi della classificazione e della caratterizzazione hanno una base oggettiva,, ovvero consistono nel puro computo delle quantità di sostanze immesse e emesse e nella loro catalogazione in categorie di impatto a seconda dei comparti e delle scale ambientali su cui agiscono. Per confrontare prodotti e processi e ottenere un punteggio singolo dall'accorpamento dei risultati per le varie categorie di impatto, è necessario valutare i danni. Ciò è possibile, nella metodologia LCA, solo con il supporto di metodi di valutazione. Si passa quindi dal dato numerico, calcolato nella fase precedente, al giudizio di pericolosità del danno rispetto a un preciso contesto ambientale o territoriale. Sull'importanza relativa dei parametri da adottare e la conseguente definizione dei fattori

di pesatura esistono differenti scuole di pensiero in tutto il mondo, poiché essi dipendono dalla particolare sensibilità e dal diverso approccio a determinati temi di impatto ambientale da privilegiare e profondamente anche dalla differente cultura. In alcuni casi si utilizzano fattori di peso uguali tra loro in modo indifferente tra le diverse categorie di danno, senza differenziare la maggiore gravità assoluta di una conseguenza ambientale rispetto a un'altra: se la generazione di un prodotto, ad esempio, influisce su sei temi ambientali, per ognuno di essi si potrà assumere che il fattore di peso sia pari ad 1/6.

Si tratta di una fase di interpretazione esplicitabile attraverso alcuni modelli:

- modello di tipo comprensivo, che include un elevato numero di parametri, rinunciando però all'accuratezza dei risultati e alla quantificazione esatta degli effetti;
- modello di tipo quantitativo, che tratta i dati con grande precisione, limitandosi ad un numero circoscritto di parametri;
- modello di tipo pragmatico, che si pone in una posizione intermedia tra i precedenti, definendo con precisione i parametri ritenuti più influenti.

Qualunque modello si decida di adottare, tuttavia, è necessario attenersi al cosiddetto "principio della distanza dallo scopo": esso afferma che tanto più vi è differenza tra lo stato attuale e quello ideale a cui si sta mirando, tanto maggiore è la gravità dell'effetto (Neri, 2008).

La fase di valutazione d'impatto, a differenza della fase di inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici, nonostante i notevoli sforzi per l'armonizzazione. Inoltre la così definita soggettività legata ai metodi di valutazione d'impatto e alla loro impostazione, che ricalca la realtà ambientale e territoriale, oltre che culturale, di ogni nazione, difficilmente agevola il raggiungimento di un consenso internazionale.

Nella fase di inventario e contabilizzazione delle sostanze coinvolte e delle emissioni in acqua, aria e suolo, i corrispondenti effetti ambientali possono solo essere stimati su ipotesi e convenzioni di affidabilità scientifica, tuttavia non sempre realmente riscontrabili nella realtà. Questo è dovuto in parte al fatto che gli effetti ambientali provocati da impatti manifestano le loro ricadute a diverse scale: globale, regionale o locale. Quindi con una difficoltà notevole nel circoscriverli o localizzarli.

Gli effetti sull'ambiente si distinguono su specifiche differenze, prevalentemente rappresentate dai riferimenti spazio-temporali adottati (estensione e ricadute territoriali dei fenomeni indagati) e dagli assunti scientifici utilizzati per la quantificazione dei danni ambientali. Hanno comunque in comune alcune attenzioni e questioni: relativamente al consumo di risorse l'attenzione è rivolta alle materie prime (minerali, fonti energetiche fossili, biomasse), considerate limitate in quanto non rinnovabili o rigenerabili in un breve lasso di tempo; alle matrici ambientali (aria, acqua, suolo); alle fonti energetiche rinnovabili (eolica, geotermica e solare) ed al consumo di territorio (inteso come forma di uso: edilizia, infrastrutture, industria, agricoltura e selvicoltura). In questo caso il danno potenzialmente prodotto è valutato in base al rapporto fra la quantità di risorsa estratta e la riduzione della sua concentrazione (o disponibilità).

Relativamente ai carichi ambientali si considerano le emissioni tossiche (metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti) e quelle

che modificano l'acidità<sup>7</sup> e i livelli nutritivi<sup>8</sup> dell'ecosistema. Per queste categorie il danno potenziale è valutato in ragione degli effetti prodotti relativamente alla perdita della biodiversità vegetale ed animale.

Leggermente più articolate e complesse risultano le valutazioni inerenti la salute umana, alla cui perdita concorrono sia gli effetti patologici direttamente causati dalla presenza nell'ambiente di sostanze chimiche, biologiche<sup>9</sup> o radioattive, sia gli effetti indiretti causati dalla modificazione dell'ambiente fisico, naturale, climatico, sociale ed urbano (ivi compreso l'uso del territorio ed i trasporti) a seguito della emissione di sostanze climalteranti<sup>10</sup>. In questo caso il danno potenziale, valutato sulla base del rapporto fra qualità e quantità di emissioni prodotte e loro effetti conosciuti sulla salute, è espresso con riferimento al numero di anni vissuti in malattia (YLD - *Years Lived Disabled*) od al numero di anni persi per morte prematura (YLL - *Years of Life Lost*).

Inevitabilmente, nella stesura della metodologia, si rendono necessari alcuni compromessi tra rigore scientifico e semplicità di restituzione, per cui il tipo di informazione fornito è un indicatore semplificato, ma non per questo errato o approssimato. Proprio per la "soggettività" nella pesatura della gravità dei danni, nonostante fondamenti di valutazione scientifici e codificati, la validità dei metodi è spesso oggetto di discussione (Van den Dobbelsteen, 2002). Servono prospettive diverse per comprendere il significato di soggettività dei metodi di valutazione LCA: *"...La mia (soggettiva) percezione è che la soggettività sia trattata come una sorta di male nella maggior parte dei contributi alla discussione in corso, da evitare a quasi qualsiasi prezzo. La soggettività sembra essere eguagliata all'arbitrarietà, che è certamente da evitare. Soggettivo, tuttavia, in connessione con il nostro problema significa solo "non oggettivo", nel senso delle (esatte) scienze esatte..."*<sup>11</sup> (Klöpper, 1998). L'oggettività nella scienza è cercata in un insieme di regole che provvedono a indirizzare le procedure per eseguire e riportare gli esperimenti e il lavoro teorico. È comprensibile come queste regole possano essere seguite meglio dalle scienze naturali rispetto che dalle scienze umane e sociali, poiché alcune discipline scientifiche, quali la fisica, la biologia, la chimica, possono più facilmente essere astratte dai parametri sociali e dalle conoscenze

7. Causata ad esempio dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia.

8. Causata dall'eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili, che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche con deterioramento della qualità delle acque.

9. L'IARC (Associazione Internazionale per la Ricerca sul Cancro) ad esempio ha sviluppato un sistema di classificazione delle sostanze basato sul maggiore o minore effetto cancerogeno riscontrato sugli animali e sull'uomo. Inoltre diversi studi epidemiologici mettono in evidenza come alcune sostanze inorganiche e numerose polveri possano essere ritenute responsabili di danni all'apparato respiratorio dell'uomo. Tra queste i particolati, come i PM10 e PM2.5; i nitrati e solfati, SO<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, CO, NO e per via indiretta le polveri sospese: TSP, NO<sub>x</sub>, CO, VOCs, NH<sub>3</sub>, SO<sub>x</sub>.

10. Ne rappresentano alcuni esempi le morti causate dalla trasmissione di malattie infettive per migrazione di vettori animali (come la malaria); da affezioni cardiovascolari e respiratorie dovute a brusche variazioni delle temperature medie stagionali; dall'intensificarsi degli eventi meteorici estremi; dai disagi procurati ai soggetti più deboli dalla migrazione delle popolazioni dalle zone costiere sommerse; dalla perdita di capacità produttiva dell'ecosistema (disponibilità di risorse alimentari).

11. Traduzione di *"...my (subjective) perception that subjectivity is treated as a kind of evil in most contributions to the ongoing discussion, which must be avoided at nearly any price. Subjectivity seems to be equalled with arbitrariness, which indeed has to be avoided. Subjective, however, in the connection with our problem only means "not objective" in the sense of the (exact) sciences"* in Klöpper, 1998.

individuali. Nel caso della LCA, valutando per comparazione se un prodotto o un tecnologia è meglio di un'altra in relazione a una categoria di danno e non a tutte, la scienza esatta non può prescindere dai valori sociali (Finnveden, 1997), tuttavia non è afferabile che non vi siano linee guida scientifiche. Alla stessa stregua esistono i valori normativi, che non sono sicuramente oggettivi, tuttavia per la maggior parte vengono codificati secondo precise procedure. La categoria più alta tra questi valori è data da una codificazione dall'ONU, ad esempio nella Dichiarazione Universale dei Diritti Umani. Le norme derivanti da tali valori normativi sono soggettive, ma sarebbe sciocco attribuire loro quel tipo di arbitrarietà e soggettività individuale, che sembra essere la grande paura in alcune parti della comunità LCA (Klöppfer, 1998).

I metodi di valutazione dell'impatto ambientale LCA hanno l'obiettivo di accorpare il più possibile ogni risultato della fase di LCI (il flusso quantificato) ai corrispondenti impatti ambientali. Secondo quanto indicato nella norma ISO 14042, i risultati dell'LCI vengono classificati in categorie di impatto, ognuna con un indicatore di categoria. Tale indicatore può essere fissato in ogni punto tra i risultati dell'LCI e i punteggi finali di categoria (dove si verifica l'effetto ambientale) nella catena causa-effetto. In questo quadro metodologico, si sono sviluppate due differenti scuole di pensiero sui metodi:

- i metodi di impatto ambientale classici (CML (Guinée et al., 2002) e EDIP (Hausschild and Wenzel, 1998)), che restringono la modellazione quantitativa alle fasi iniziali della catena causa-effetto, ai punti intermedi, per limitare le incertezze e raggruppano i risultati LCI nelle cosiddette categorie intermedie (*impact categories*), in relazione al tema ambientale rispetto all'impatto. Per tema si fa riferimento ai comuni meccanismi di cambiamento ambientale (es. il cambiamento climatico) o i raggruppamenti accettati dalla comunità scientifica (es. l'ecotossicità).
- i metodi orientati al danno come Eco-Indicator 99 (Goedkoop and Spriensma, 2000) o EPS (Steen, 1999), che tentano di definire la catena causa-effetto fino al punteggio finale, o danno ambientale, nelle categorie di danno (*damage categories*), talvolta con un alto grado di incertezza.

Nel 2003, lo studio SETAC/UNEP *Life Cycle Initiative*<sup>12</sup> ha suggerito di utilizzare i vantaggi di entrambi gli approcci raggruppando i punteggi finali di categoria simili in una serie strutturata di categorie di danno. Per fare un esempio e comprendere meglio: i risultati dell'inventario LCI con percorsi di impatto simili (es. tutti i flussi base che influenzano le concentrazioni di ozono stratosferico) vengono raggruppati in categorie di impatto a un livello intermedio, nelle così dette categorie intermedie (es. nella *ozone layer depletion* – categoria intermedia). L'indicatore intermedio<sup>13</sup> caratterizza i flussi di base dell'LCI e altri interventi ambientali che contribuiscono allo stesso impatto. Un livello successivo alloca

12. SETAC è acronimo di *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* e UNEP di *United Nations Environment Programme*. L'iniziativa riguarda l'*International Life Cycle partnerships for a Sustainable World* e consiste in un partenariato internazionale sul Ciclo di Vita, noto come l'iniziativa del ciclo di vita, per consentire agli utenti di tutto il mondo di mettere in pratica in modo efficace il concetto del ciclo di vita. L'iniziativa risponde alla richiesta da parte dei governi di tutto il mondo per una *Life Cycle economy*, sancita nella Dichiarazione di Malmö (2000). Essa contribuisce ai programmi quadro per i prossimi 10 anni per promuovere il consumo e modelli di produzione sostenibili, come richiesto in occasione del vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile di Johannesburg (2002).

13. Il termine "punteggio medio" esprime il concetto per cui il punteggio si localizza circa nella posizione intermedia tra i risultati LCI e il danno (o punteggio finale).

queste categorie intermedie di impatto a una o più categorie di danno, che rappresentano il cambio di qualità dell'ambiente<sup>14</sup>. In pratica, un risultato dell'indicatore di danno è sempre un modello semplificato di una realtà molto complessa, e offre solo una approssimazione allo stato di qualità dell'elemento analizzato (Jollier et al., 2003a). Un esempio di metodo strutturato su quest'ultimo approccio integrato fra punteggio intermedio e punteggio finale o danno è il metodo IMPACT 2002+ (Jollier et al., 2003b), in cui per esempio i risultati LCI dei flussi base, che influenzano le concentrazioni di ozono stratosferico, vengono accorpati nella categoria di impatto intermedia *Ozone Layer Depletion*, la quale viene successivamente accorpata nella categoria di danno, con il punteggio finale, Salute Umana (*Human Health*) insieme a altre categorie di impatto che hanno influenza su tale categoria (es. *Human toxicity*, *Respiratory effects*, *Ionizing radiation*, etc.). *Ozone Layer Depletion* viene accorpata anche alla categoria di danno Qualità dell'Ecosistema (*Ecosystem Quality*), avendo effetto anche sul cambio di qualità dell'ecosistema ambientale oltre che sulla salute umana, insieme a categorie di impatto come *Aquatic ecotoxicity*, *Terrestrial ecotoxicity*, *Aquatic Acidification*, *Aquatic Eutrophication*, etc.

Ulteriormente comparando, per esempio, alcuni metodi ormai radicati nell'applicazione della metodologia LCA, quali Eco-Indicator 99 (olandese), EPS 2000 (svedese) e EDIP96 (danese)<sup>15</sup>, è possibile individuare le similitudini e le peculiarità. Nei tre metodi i danni vengono classificati in categorie di danno, che vengono a loro volta raggruppate in categorie di impatto; le categorie di impatto rappresentano buona parte di tutte le problematiche ambientali, qualsiasi sia il comparto ambientale (acqua, suolo o aria) sul quale hanno influenza. Nel metodo olandese le categorie di danno sono la salute umana, la qualità dell'ecosistema e l'uso delle risorse. Simili sono quelle di EPS a cui di aggiunge la categoria delle biodiversità, relative all'estinzione delle specie. Nel metodo EDIP vi sono le categorie di impatto, quali il surriscaldamento del globo, l'assottigliamento dello strato di ozono, l'acidificazione, l'ecotossicità, la tossicità per l'uomo, e le categorie dell'uso di risorse, che in realtà viene valutata in un metodo correlato a questo, quale EDIP 96 (*resources only*). Tuttavia quest'ultimo metodo valuta molto poco l'esaurimento delle risorse primarie. Mediante l'operazione di caratterizzazione, nei tre metodi, si ottengono dei valori espressi con unità di misura diverse e soltanto mediante le operazioni di normalizzazione e valutazione si può ottenere un valore adimensionale (Pt; punti) che rappresenta l'impatto ambientale associato al prodotto.

Ciò che distingue EPS 2000 da Eco-Indicator 99 sono le diverse categorie di impatto e di danno, un sistema diverso di misura del fattore di caratterizzazione, un concetto differente alla base di stampo economico. La peculiarità di EPS 2000 è infatti quella di voler stimare il danno in base alla buona volontà da parte della società a pagare (*willingness to pay*) per evitare un peggioramento delle condizioni considerate, attribuendo un valore economico al danno. Ciò che distingue EDIP 96 dagli altri metodi di valutazione sono: le diverse categorie di impatto e di danno, un sistema diverso di misura del fattore di caratterizzazione, un

---

14. Un risultato dell'indicatore di danno è la rappresentazione quantitativa di questo cambio qualitativo.

15. Il metodo degli ecoindicatori è stato sviluppato dalla Pre per conto del ministero dell'Ambiente olandese. La versione utilizzata in questo lavoro è la più recente e risale al 1999. Il metodo EPS (*A systematic approach to environmental priority strategies in product development, version 2000*) è stato definito dalla University of Technology di Chalmers in Svezia e il metodo EDIP (*Environmental Design of Industrial Products*) è nato da un progetto del UMIP, Ministero dell'ambiente danese, nel 1996.

concetto differente di base ossia il tentativo di vedere qual è il danno rispetto ad un anno di riferimento, il 2000.

Anche nel settore edilizio i metodi usati sono solo stranieri. Sono molti i Paesi Europei ed extra-Europei che negli ultimi decenni si sono dotati di strumenti volontari di valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali e prodotti edilizi, costituiti da banche dati LCI e strumenti software in grado di semplificare l'applicazione della disciplina LCA all'edilizia, nonché di supportare gli operatori del settore nella fase di interpretazione degli output finali. L'Italia denuncia un ritardo in questo senso, sia nella definizione di strumenti di valutazione LCA nazionali di riferimento, sia nell'applicazione di quelli elaborati da altri Paesi nella pratica progettuale. Le principali conseguenze, che si ripercuotono sull'uso di questi strumenti nel settore edilizio, riconducibili a questo ritardo scientifico-tecnico sono dovute a una scarsa rappresentatività dei dati riguardo a prodotti locali e regionali, tipici della realtà produttiva nazionale; a un computo di impatti ambientali non ascrivibili direttamente al sistema energetico-produttivo italiano e non facilmente scorporabili nella pratica corrente progettuale, dovuti per esempio alla contestualizzazione dei mix energetici differenti da quello nazionale (materiali e prodotti provenienti da Francia, Germania o Svizzera ad esempio contengono anche una parte di impatti ambientale dovuta alla produzione di scorie radioattive nelle centrali nucleari di produzione dell'energia elettrica, così come il mix italiano è per la maggior parte di energia prodotta e importata dall'estero); l'utilizzo, nelle valutazioni LCA, di soluzioni (materiali e processi) non riscontrabili direttamente sul mercato italiano; oltre allo scarso controllo delle soluzioni dichiarate eco-efficienti e sostenibili dai produttori, senza alcuno specifico fondamento scientifico di simili caratteristiche prestazionali, a fronte solo di una ipotizzata origine naturale.

Nonostante la carenza di metodi *made in Italy*, chi opera valutazioni LCA nel settore edilizio e vuole giungere al punteggio finale fa ricorso ai metodi stranieri, dichiarandone la dovuta approssimazione per ogni caso specifico. La scelta di un metodo non è semplice. Va infatti sottolineato come l'analisi dell'impatto condotta su uno stesso materiale o componente edilizio, piuttosto che sull'edificio, effettuata con metodi di valutazione differenti dà con certezza risultati differenti e non confrontabili, poiché gli indicatori sono molto disomogenei tra loro e assumono pesi differenti, proprio per quel carattere di "soggettività" spiegato sopra. In questa ottica l'effettiva qualità ambientale dei prodotti e componenti scelti per un edificio dipende dalle caratteristiche del metodo usato. Il rischio è di ottenere valutazioni degli impatti di prodotti, in cui si privilegiano da un lato solo alcuni aspetti o dall'altro si evidenziano impatti pesati secondo principi non consoni con la realtà che si sta considerando (fig. 2-11).

D'altra parte ogni tecnica di valutazione presenta necessariamente delle limitazioni, da conoscere e tenere in adeguata considerazione durante l'utilizzo, in particolare:

- la natura delle scelte e delle assunzioni fatte nell'LCA può essere soggettiva;
- i modelli utilizzati per l'analisi inventariale o per valutare impatti ambientali sono limitati dalle assunzioni implicitamente contenute in esso; tali modelli potrebbero non essere adeguati per tutte le applicazioni;
- i risultati di uno studio di LCA focalizzati su questioni globali o regionali potrebbero non essere adeguate per applicazioni maggiormente circoscritte;
- l'accuratezza di uno studio di LCA può essere limitata dall'accessibilità o dalla disponibilità di informazioni rilevanti o di precisione elevata;

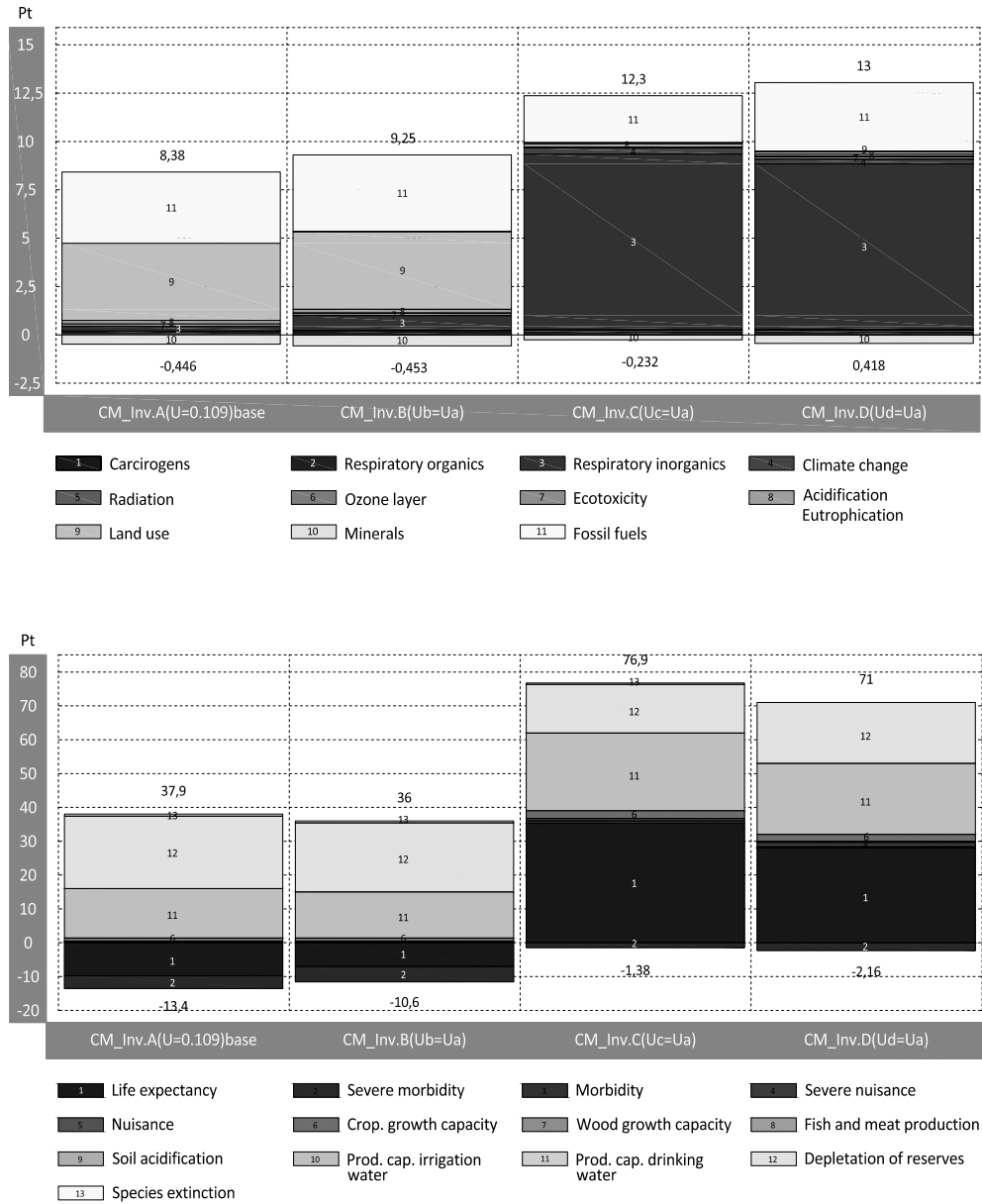


Fig. 2-11: Due grafici che mettono in evidenza i risultati (differenti) della valutazione LCA degli impatti ambientali con due metodi diversi (Ecoindicator nel primo caso e EPS 2000 nel secondo caso) di una comparazione di 4 involucri ad alta efficienza energetica: se nel primo metodo (olandese) l'uso del suolo (in arancione) emerge come impatto di un certo peso, nel secondo metodo lo stesso indicatore non emerge quasi (linea marrone) (elaborazione da risultati ottenuti dal software Sima Pro).

- la mancanza di una dimensione spaziale e temporale nell'inventario (*inventory*) dei dati utilizzati per la valutazione dell'impatto introduce incertezza sui risultati dell'impatto;
- tale modello è di tipo scientifico, quindi è per sua natura una semplificazione di un sistema fisico: non è possibile un'assoluta e completa rappresentazione di ogni effetto sull'ambiente.

In generale, le informazioni ottenute attraverso uno studio di LCA dovrebbero servire come parte di processo decisionale a un più ampio raggio e essere usate per comprendere gli scambi globali o generali. Il confronto dei risultati di differenti studi di LCA è possibile solamente se le assunzioni e il contesto di ciascuno studio sono i medesimi. Per ragioni di trasparenza è importante che queste assunzioni vengano esplicitamente dichiarate, così come il metodo di valutazione utilizzato.

L'LCA non è considerabile come una metodologia in grado di fornire risultati assoluti, completi e pienamente esaustivi, poiché fa uso di valutazioni di carattere soggettivo, soprattutto laddove si ha una mancanza di informazioni rigorose. Tuttavia è riscontrabile dall'esperienza applicativa che, nonostante l'applicazione di metodi diversi per la valutazione, quindi punteggi su scale differenti, la tendenza dei risultati è confrontabile e indicativa per operare una Analisi dei risultati (*Interpretation o Sensitivity Analysis*) e la valutazione dei miglioramenti (secondo la norma ISO 14043)<sup>16</sup>.

In un quadro di incertezze, è auspicabile una convergenza verso l'armonizzazione dei metodi, a livello europeo: nonostante la quantificazione delle ricadute ambientali, e in particolare la possibilità di circoscriverle geograficamente, sia un'operazione difficile, l'opportunità di comprendere i fenomeni di interazione dell'attività umana con l'ambiente costituisce comunque un obiettivo importante.

#### 2.4. Strategie di applicazione in architettura

Una certezza diventata imprescindibile che si sta diffondendo in architettura e in edilizia è l'importanza della diffusione della conoscenza degli impatti ambientali a lungo termine di materiali, componenti e soluzioni tecnologiche per gli edifici. È ormai noto come una scelta progettuale, in relazione a materiali e soluzioni tecnologiche e alla loro filiera produttiva, sia in grado di generare impatti ambientali paragonabili a decenni di consumo energetico da parte di un edificio, realizzato senza alcun criterio di risparmio energetico. Ancora una propaganda di sensibilizzazione è necessaria, invece, per far comprendere come l'applicazione della metodologia LCA in architettura e l'uso di indicatori sintetici di impatto ambientale debbano servire all'ottimizzazione del ciclo di vita del "sistema edificio", al fine di comprendere, di volta in volta e per ogni caso specifico, quali siano le fasi su cui agire per ridurre gli impatti ambientali. Nell'approccio all'uso della LCA in architettura non è facilmente perseguibile una ottimizzazione completa di tutte le fasi del ciclo di vita; di conseguenza è indispensabile definire chiari obiettivi di ottimizzazione. Se si compiono scelte di materiali e componenti ponendo attenzione agli impatti ambientali della fase di produzione e trasporto, per migliorare la fase pre-consumo, non è scontato che ciò determini altrettanti bassi impatti nella fase di gestione e manutenzione e al fine vita. La singola strategia prevede

---

16. E' la fase finalizzata ad interpretare i risultati dell'analisi identificando le criticità ambientali e mettendo in evidenza le potenzialità di miglioramento sia tecniche che gestionali del ciclo di vita del prodotto oggetto di studio.



di perseguire un risultato finale con caratteristiche differenti, oltre che contrastati, rispetto al risultato ottenibile con una strategia diversa. La scelta della strategia è da compiere in relazione al contesto progettuale e al tipo di edificio, alla sua forma e funzione, alla sua vita utile prevista. La traduzione di questi concetti nei termini della metodologia LCA consiste nella definizione degli obiettivi e dei confini del sistema da analizzare.

Un concetto importante è che il ruolo della valutazione ambientale LCA deve proseguire parallelamente alle fasi della progettazione dell'edificio e non essere solo una verifica finale, deve essere uno strumento operativo e di supporto decisionale rispetto agli obiettivi preposti. Le tipologie di analisi LCA adottabili in generale sono differenti, a seconda dei settori o delle fasi coinvolti o dei livelli da analizzare (scala del materiale, scala del componente, scala del sub sistema tecnologico, scala dell'edificio). L'applicazione della analisi LCA può essere fatta più o meno dettagliatamente in relazione allo scopo e agli obiettivi dello studio. I principali livelli di approfondimento sono:

- a. una *LCA di prodotto* (definita "semplificata"), in cui viene considerato solamente il manufatto in esame, non i processi secondari di produzione, si computano gli impatti delle materie prime, dei combustibili e dell'energia elettrica utilizzati esclusivamente nella linea di prodotto (non sono considerati *input* ed *output* di processo derivanti dalla produzione a monte, quella della materia prima nel processo fondamentale); tale analisi è piuttosto semplificata, utilizza dati generici, sia di carattere quantitativo che qualitativo, per rendere le valutazioni il più possibile semplici. Lo scopo dell'LCA di prodotto è quello di fornire essenzialmente alcune linee guida per i processi indagati. A volte, però, il livello di accuratezza non permette di ottenere affidabilità sui risultati<sup>17</sup>. Il primo obiettivo da perseguire è quindi quello di individuare le informazioni che possono essere omesse senza compromettere il risultato finale. La semplificazione del metodo si basa su tre stadi che sono iterativamente legati:
  - Indagine: identificazione delle parti del ciclo di vita più importanti o quelle che presentano maggiori lacune di dati;
  - Semplificazione: dai risultati dell'indagine si imposta il lavoro sulle parti del sistema ritenute più importanti;
  - Valutazione dell'affidabilità: si verifica che le semplificazioni introdotte non riducano in modo significativo l'affidabilità del risultato complessivo.
- b. una *LCA a tecnologia allargata* (definita "di selezione") in cui si valutano i prodotti ed i processi correlati al processo in analisi, impiegati per le materie prime e i semilavorati nel corso del processo fondamentale; a questo livello si tralasciano comunque alcuni processi minori, è usata comunemente quando devono essere identificate azioni chiave per il miglioramento ambientale nel ciclo di vita dei prodotti, in parti di processo specifiche. La sua caratteristica principale è quella di far uso di codici di calcolo che aiutano a gestire la realizzazione dell'LCA, facendo riferimento a dati già disponibili da banche dati o stimati con approssimazione. Dai risultati ottenuti, e a seguito di un'analisi di sensibilità, si individuano i dati critici sui quali è necessario intervenire per un miglioramento della loro qualità ambientale. È un sistema rapido che permette di valutare gli aspetti realmente importanti del ciclo di vita, su cui focalizzare l'attenzione.

---

17. Con questo tipo di metodo non è possibile definire un metodo di semplificazione standardizzato che consenta, eventualmente, di ottenere risultati comparabili con quelli di un LCA dettagliato; per questo motivo il metodo va adottato con precauzione, sulla base degli obiettivi specifici proposti.

- c. una *LCA completa* (definita “dettagliata”), che comprende tutte le fasi del manufatto in oggetto e dei processi correlati (implica anche processi di estrazione e trasporto di combustibili nel luogo di utilizzo, processi di produzione di attrezzature ed edifici impiegati nei vari processi, impatti diretti, impatti indiretti, uso del suolo da parte dei capannoni industriali in cui avviene la produzione, etc.); questo tipo di analisi prevede l’esame di molti processi e, di conseguenza, un numero ancora superiore di impatti sull’ambiente. Uno studio dettagliato prevede un miglioramento della qualità dei dati e, invece che riferirsi a dati standard o dati secondari, è auspicabile procede con la raccolta e l’utilizzo di dati specifici del caso in esame forniti dalle stesse aziende. E’ il metodo più lungo e più oneroso, ma è quello che fornisce la maggiore affidabilità.

Nella specificità della LCA applicata all’edificio e alle sue parti sarebbe ovviamente auspicabile applicare un livello di approfondimento completo o dettagliato (c) di un edificio, quantificando: dalle quantità dei materiali per le strutture e i subsistemi principali, scendendo di dettaglio, fino a comprendere le quantità di materiali per i cavi elettrici, per gli interruttori, per i sanitari, i tubi degli impianti e ogni singola/piccola parte del manufatto. La completezza dell’applicazione implica considerare anche tutte le fasi del ciclo di vita dell’edificio, e per ogni componente coinvolto anche la sua durabilità o durata e il suo possibile fine vita: tutti questi aspetti vanno messi a bilancio nell’LCI. Per diverse ragioni di seguito enunciate tale livello non è realisticamente utilizzabile nel settore edilizio: non sono facilmente perseguibili le informazioni, di carattere progettuale e costruttivo, e le quantità relative a tutte le parti dell’edificio;

- nella maggior parte dei casi e nella prassi diffusa non sempre sono note tutte le scelte tecniche esecutive dalla fase progettuale, poiché spesso vengono decise in corso d’opera;
- non è obiettivo della applicazione LCA al progetto architettonico e alle costruzioni l’esaurire la completezza dei dati fino al minimo dettaglio, piuttosto che impiegare le potenzialità della metodologia per comparare soluzioni simili o contributi di fasi del ciclo di vita differenti, e comprendere dove si concentrano i maggiori impatti ambientali del caso considerato;
- l’obiettivo della LCA applicata all’edificio o alle sue parti non è di raggiungere un punteggio finale assoluto singolo, finalizzato a se stesso, ma di consentire giudizi migliorativi laddove emerge uno squilibrio di impatto o, perlomeno, presa di coscienza (spesso accade che per andare a perfezionare dal punto di vista degli impatti un aspetto, si è costretti ad accettare il peggioramento di altri aspetti e, in tal caso, il paragone serve per comprendere quale aspetto provochi minor danno ambientale);
- nel settore delle costruzioni emerge chiaramente l’utilità della LCA comparativa tra edifici, tra subsistemi, tra soluzioni materiche, tecnologiche, strutturali differenti per uno stesso subsistema, tra componenti differenti ma con prestazioni (meccaniche, termiche, acustiche, di resistenza al fuoco, etc.) uguali; da ogni comparazione emergono i limiti e le potenzialità di ogni sistema considerato e, tramite una analisi interpretativa dei risultati LCA, si possono valutare soluzioni alternative o ottimizzazioni di alcuni aspetti progettuali.

Tuttavia, facendo riferimento agli studi applicativi del settore reperibili in letteratura, l’applicazione più diffusa vede il livello di approfondimento a tecnologia allargata o di selezione (b).

Per cui tipicamente si conducono:

- LCA comparativa di materiali da costruzione, per una o più fasi del ciclo di vita;
- LCA comparativa di componenti o sistemi tecnologici, per una o più fasi del ciclo di vita;
- LCA comparativa di sottosistemi dell'edificio, per una o più fasi del ciclo di vita;
- LCA di edificio, in cui si comparano gli impatti delle diverse fasi del ciclo di vita: quella pre-uso con la fase di trasporto dei materiali dall'azienda al cantiere, la fase di cantiere, la fase di gestione, con la manutenzione, la fase di fine vita.

Nel settore esistono studi di applicazione della metodologia LCA alla scala del materiale e del componente, che possono considerarsi con livello di approfondimento completo (c), con la finalità di costruire tutto il processo produttivo, dalla culla al cancello, quindi dal reperimento delle materie prime, alle lavorazioni industriali fino all'imballaggio, considerando tutti rami della catena dei flussi con gli impatti ambientali dei macchinari (e della loro costruzione), l'uso del suolo da parte dell'industria e, a monte, delle industrie o cave di reperimento delle materie prime, etc. Queste valutazioni servono in realtà per creare la voce di processo relativa all'impatto ambientale per una unità definita di materiale edilizio (1kg, 1 mc. di materiale), che vanno a costituire o sono assimilabili alle voci contenute nelle banche dati di riferimento per la LCA. Quindi è afferabile come nelle valutazioni di tipo tecnologico allargato, alla scala edilizia, rientrano sicuramente molti processi che, presi singolarmente, sono considerabili come esiti di LCA complete. Riguardo alle applicazioni LCA che confrontano fasi del ciclo di vita dell'edificio, emergono lavori di ricerca scientifica che analizzano nello specifico singole fasi, la fase pre-uso dell'edificio piuttosto che la fase di fine vita di edificio e componenti, con l'obiettivo di comprendere, in un caso, i processi produttivi più incidenti sull'impatto ambientale della costruzione dell'edificio (Niklaus et al., 1997; Blengini, Di Carlo, 2010a; Bendewald, Olgyay, Yeang, 2010) e, nel secondo caso, gli scenari di fine vita possibili e i vantaggi o i limiti di ogni scenario (discarica, termovalorizzazione, riciclo o riuso) (Schuurmans-Stehmann, 1994; Buth, Achard, Le Teno, Chevalier, 1997; Thormark, 2002; Blengini, 2009).

L'impiego della LCA quale metodologia a supporto della progettazione e all'ottimizzazione di filiere produttive, in generale, è rintracciabile fin dai primi anni Novanta (Alting, Jørgensen, 1993; Goggin, 1994; Holloway et al., 1994; Alting, Legarth, 1995; Matthew et al., 2001) e quale metodologia con codici di calcolo ottimizzabile per il settore edilizio dal 1996, alla scala dell'edificio (Polster et al., 1996; Mahdavi, Ries 1998, Erlandsson, Borg, 2003; Li, 2006; Zhang et al., 2006; Millet et al., 2005; Asdrubali et al., 2008; Lee, Tae, Shin, 2009; Verbeeck, Hens, 2010; Malmqvist et al., 2011) e alla scala del materiale e componente (Abel, Edwards, Ashby, 1994; Chevalier, Le Tfinot, 1996; Alcorn, Wood, 1998; Johsson, 2000; Bovea, Gallardo, 2004; Ortiz et al. 2009).

Si è andato intensificando il largo uso della LCA comparativa nella progettazione architettonica dal 1996 a oggi, con un incremento dei casi applicativi, riscontrabili in letteratura scientifica, di anno con anno. Vi sono ormai molti casi applicativi alla scala dell'edificio: una tendenza vede l'uso della metodologia per la valutazione dell'impatto ambientale su un edificio, quale caso di studio singolo (Asif, Muneer, Kelley, 2007; Kofoworola, Shabbir, 2008; Ortiz et al., 2009; Blengini, Di Carlo, 2010b), in cui si mettono in luce i diversi impatti nelle fasi del ciclo di vita oppure le incidenze dei vari sistemi dell'edificio rispetto all'impatto ambientale e energetico complessivo (es. l'incidenza sugli effetti ambientali della struttura o dei materiali edilizi rispetto all'intero ciclo di vita dell'edificio (Haapio, Viitaniemi, 2008)); così come su più edifici comparati fra loro, siano essi edifici residenziali (Peuportier, 2001;

Ortiz-Rodríguez et al., 2010; Chan et al., 2010; Thiers, Peuportier, 2012; Rossi et al., 2012; Cuéllar-Franca, Azapagic, 2012) o per il terziario (Perez Fernandez, 2008, Wu et al., 2012), scolastici (Varun et al., 2012) o pubblici (Myer, Chaffee 1997; Ardente et al., 2011; Iyer-Raniga, Pow Chew Wong, 2011).

Un uso ampiamente codificato della LCA comparata è riscontrabile alla scala del subsistema, in cui si comparano tecnologie con materiali differenti o alternative tecnologiche di prodotti, per esempio si comparano due differenti sistemi strutturali, acciaio *versus* legno oppure acciaio *versus* calcestruzzo, applicati a un medesimo edificio, al fine di comprenderne la soluzione più eco-efficiente, a parità di prestazioni meccaniche (Eaton, Amato 1998; Lenzen, Treloar, 2002). Oppure, in fase progettuale la comparazione degli impatti ambientali consente di disporre di uno scenario completo delle prestazioni fra soluzioni tecniche alternative (d'involucro, di finitura superficiale, di sistemi di facciata o copertura, di isolamento termico, di solaio di copertura, di pavimentazione), oltre che estetiche, termiche, acustiche, di resistenza al fuoco, etc., anche quelle di impatto ambientale (Potting, Block, 1995; Citherlet, Di Guglielmo, Gay, 2000; Nicoletti et al., 2001; Petersen, Solberg, 2005; Kosareo, Ries, 2007; Nebel et al., 2006; Azari-Na, Kim, 2011; Kim, 2011; Monteiro, Freire, 2012; Ottelé et al. 2011). La costante sottesa alle applicazioni comparative della LCA è l'unità funzionale U.F.: è importante comparare prodotti, componenti, sistemi diversi sulla base di una unità di prestazione uguale, al fine di rendere confrontabili i risultati relativi (es. U.F. pari a 1 mq. di superficie di involucro, se comparo sistemi di facciata, U.F. pari a 1 mq. di superficie utile a pavimento, se si comparano delle quantità che per essere confrontate vanno normalizzate rispetto a un comune denominatore).

Vi sono studi applicativi della LCA al ciclo di vita dell'edificio, più recenti, che iniziano a computare nel ciclo di vita gli effetti della durata di vita dello stesso e della durabilità delle sue parti, considerando l'impatto relativo alla manutenzione e sostituzione di parti (Blom et al., 2010; Aktar, Bilec, 2012). Altri studi riguardano concetti di LCA dinamica (*dynamic LCA*), ovvero valutano la performance dell'edificio considerando le variazioni temporali in ambiente interno e le condizioni esterne durante la vita operativa di un edificio, incorporando la possibilità di aggiornare rapidamente i risultati della LCA sulla base di modifiche al progetto o sulla variazione del funzionamento dell'edificio (scenari di modellazione dinamica) (Pehnt, 2006; Collinge et al., 2011).

Rispetto alle diverse scale dell'architettura, vi sono atteggiamenti diversi nelle strategie applicative della LCA relativamente alla considerazione di tutti o solo alcuni degli indicatori ambientali sintetici: alcune applicazioni adottano la strategia della semplificazione effettuando una valutazione LCA che verifica solo i consumi energetici (indicatore di Energia Incorporata – *Embodied Energy*) e le emissioni di anidride carbonica equivalenti (indicatore del Surriscaldamento del Globo – *Global Warming Potential*) (Lin, 2003; Koroneos, Kottas, 2005; Asdrubali et al., 2008. Fernandez, 2008, Monahan, Powell, 2011), con la conseguente facilitazione nel confronto immediato dei risultati tra le fasi del ciclo di vita, oltre a una disseminazione dei valori finali più *user friendly*, dal momento che il risparmio energetico e le emissioni di CO<sub>2</sub>eq. sono concetti comunemente più noti e diffusi rispetto ai problemi ambientali dell'acidificazione delle acque e dei suoli, piuttosto che delle emissioni di SO<sub>2</sub>eq. per l'assottigliamento dello strato di ozono.

Sicuramente vi sono ancora avanzamenti da perseguire nel trasferimento di tale metodologia al settore dell'architettura, armonizzazioni nelle procedure, al fine di rendere molto più confrontabili gli esiti di studi simili, fatti in contesti di ricerca o applicativi diversi.

È necessario sensibilizzare maggiormente i progettisti alla valutazione dei problemi ambientali generati dall'atto progettuale e costruttivo e far comprendere loro come, un'altra volta, le questioni ambientali non possono essere semplificate per svincolare dalla complessità o manipolate per l'ottenimento di marchi o etichette, ma vanno considerate seriamente e comprese fino in fondo. È comprensibile in ogni caso come non sia semplice dalla teoria dell'applicazione LCA poter far corrispondere una completezza e correttezza nell'eco-efficienza delle soluzioni adottate in un edificio e per tutte le fasi del ciclo di vita. Ogni situazione è singolare e unica, legata a un contesto fisico, territoriale e sociale, e su quella è possibile calibrare la scelta architettonica e costruttiva, non dimenticando la verifica degli impatti ambientali, forse non per tutte le fasi del ciclo di vita, ma adottando strategie progettuali e realizzative che abbiamo presente il manufatto e i possibili scenari nelle diverse fasi.

## 3

### CICLO DI VITA DEL COMPONENTE E OTTIMIZZAZIONE NELL'USO DELLA MATERIA\*

Nella fase di progettazione definitiva ed esecutiva, il progettista si trova di fronte alla scelta di soluzioni tecniche che implicano consumo di risorse non rinnovabili e di materie prime di vario genere. Sempre assumendo il duplice riferimento alla circolarità tra livelli di informazione del progetto da un lato e tra flussi di materiali e energia per la costruzione dall'altro, nel presente capitolo la valutazione LCA viene a supportare la tesi per cui sia oggi sempre più indispensabile adottare soluzioni tecniche che richiedano l'uso di minima materia per la massima efficienza formale e funzionale.

L'approccio della valutazione LCA comparativa fra materiali e elementi tecnici differenti consente, da un lato, di verificare gli impatti ambientali generati nella fase di produzione dei materiali e, dall'altro, di approfondire attraverso la comparazione del peso dei materiali (trasformati in elementi tecnici) l'incidenza sull'eco-profilo della soluzione tecnica da scegliere e, di conseguenza, sul dimensionamento del subsistema delle strutture.

#### **3.1. Paradigma della leggerezza per la riduzione degli impatti ambientali nei processi industriali e nelle scelte tecniche del progetto**

Nel progetto un'attenzione all'ottimizzazione della forma dell'edificio e delle sue parti verso la realizzazione di architetture più leggere<sup>1</sup>, che usino la materia in modo razionale e funzionale, è necessaria per rinnovare l'equilibrio del rapporto di tra natura e costruito. Significa porre la ricerca della leggerezza quale paradigma progettuale, con la sua implicita duplice accezione di alta efficienza formale da un lato, e alta efficienza materica dall'altro. La corretta combinazione di entrambe rappresenta il miglior esito perseguibile da un progetto attento alla riduzione dell'uso di materie prime e di energia (in particolare di quelli non rinnovabili) per la produzione di componenti e sistemi edilizi e degli impatti ambientali della costruzione nella fase d'uso.

*\*Tutti i grafici esiti delle valutazioni LCA sono elaborazione dell'autore e frutto del minuzioso supporto grafico e di layout di Lucia Ticozzi*

1. *"I nostri tempi richiedono maggior leggerezza, maggiore risparmio di energie, maggiori mobilità e adattabilità; in breve esigono costruzioni più in sintonia con la natura, capaci al tempo stesso di non disattendere le domande di sicurezza e protezione. Queste rinnovate richieste rendono necessario un ulteriore sviluppo delle costruzioni leggere. L'architettura di domani, sia alla scala dell'edificio che a quella del territorio, dovrebbe essere progettata perseguendo i principi della costruzione a massa minima e a energia minima" (Otto, 2004, tr. it. 2007, p. 6).*

L'applicazione di una valutazione comparativa LCA è lo strumento adeguato per poter quantificare e confrontare gli impatti ambientali e i consumi di materia e energia nel ciclo di vita delle diverse soluzioni tecniche progettuali, al fine di orientare il progettista alla soluzione più adeguata e eco-efficiente per il contesto del progetto e le prestazioni attese. La valutazione LCA, prima della comparazione fra i diversi cicli di vita delle soluzioni tecniche progettuali, indaga il ciclo di vita di ogni materiale, quindi analizza gli impatti ambientali provocati dalla filiera produttiva dell'industria manifatturiera, con i confini del sistema che vanno dalla fase di reperimento delle materie prime, ancor prima della culla, cioè della nascita di sostanze/materiali che compongono il prodotto, al prodotto confezionato, imballato e pronto per il trasporto in cantiere (dalla culla al cancello, *from cradle to gate*, in termini tecnici della metodologia di analisi). In tal caso la valutazione è di supporto all'industria al fine di revisionare tutti i processi della filiera produttiva e individuare i processi da modificare e ottimizzare per risparmiare energia e ridurre emissioni nocive.

Un esempio di applicazione della valutazione LCA per le finalità sopra indicate è quello relativo alla comparazione di alcuni materiali trasparenti per soluzioni tecnologiche di copertura, al fine di dimostrare la soluzione migliore dal punto di vista delle prestazioni ambientali, a parità di prestazioni tecniche e energetiche. Nello specifico il caso applicativo focalizza l'attenzione sul confronto fra materiali trasparenti ormai codificati in architettura e un materiale di nuova generazione, frutto dell'evoluzione dell'industria chimica dei polimeri, del trasferimento tecnologico all'architettura da altri settori e della sperimentazione all'interno del sistema componente per l'edilizia. Si tratta da un lato di materiali quali il vetro, il polycarbonato e il pvc trasparente e dall'altro dell'etfe (etilenetetrafluoroetilene) della famiglia dei fluoropolimeri, una nuova generazione di materiali plastici con un potenziale promettente di diffusione nel campo della progettazione architettonica e del settore delle costruzioni. La peculiarità della tecnologia produttiva del fluoropolimero e del film estruso che ne deriva, della progettazione e delle tecniche di confezionamento e assemblaggio del sistema a cuscini pneumatici, in cui il film diventa un componente d'involucro, è sperimentata e ormai radicata in architettura da circa venticinque anni, anche se applicata in ambiti specifici e su richieste di nicchia; più recente è la sua sempre più frequente diffusione su scala internazionale tra i possibili sistemi di involucro trasparente.

La conoscenza del profilo ambientale dell'etfe è scarsa e attualmente oggetto di indagine nel settore della ricerca e da parte delle industrie chimiche che producono fluoropolimeri. In merito a questi aspetti il caso di applicazione LCA descritto in questo capitolo ha il primo obiettivo di indagare il ciclo di vita e gli impatti ambientali dell'etfe, al fine di comprendere quale fase della catena produttiva del sistema d'involucro a cuscini generi emissioni di sostanze nocive all'ambiente e maggior consumo energetico. Quindi la valutazione seguente stima tramite un rigoroso approccio scientifico, i cui esiti sono passibili di perfezionamento e dettaglio, i valori di energia incorporata (*Embodied Energy* – u.d.m MJ) e di altri indicatori ambientali, definiti categorie d'impatto, quali il potenziale di effetto serra (*Global Warming Potential* – u.d.m. kgCO<sub>2</sub>eq.), il potenziale di assottigliamento dello strato di ozono (*Ozone Depletion Potential* – u.d.m. kgCFC<sub>11</sub>eq.), l'ossidazione fotochimica (*Photochemical Oxidation* – u.d.m. kgC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>eq.), il potenziale di acidificazione (*Acidification Potential* – u.d.m. kgSO<sub>2</sub>eq.) e quello di eutrofizzazione (*Eutrophication Potential* – u.d.m. kgPO<sub>4</sub>---eq.).

Questa tipologia di nuovi componenti per l'involucro presuppone un elevato livello di sperimentazione delle proprietà del materiale e della tecnologia costruttiva del sistema nella maggior parte dei progetti. E laddove la valutazione LCA è applicata a campi di

indagini sperimentali, il progetto sperimentale ha come riferimento la produzione; quindi gli interlocutori (*stakeholder*) degli esiti della prima fase di indagine del caso studio sono l'industria chimica e i produttori di film polimerici ad un lato, e le aziende di confezionamento e assemblaggio dei componenti pneumatici per l'architettura dall'altro; i primi impegnati a far fronte alle richieste normative di riduzione di consumi e emissioni nocive all'ambiente nella loro filiera, i secondi a voler fornire sistemi tecnici sicuri, efficienti e concorrenziali con quelli già presenti nel settore edilizio.

Dopo l'indagine specifica sull'eco-profilo dell'etfe, lo studio affronta la comparazione degli impatti ambientali dei quattro materiali trasparenti e degli elementi tecnici di involucro, realizzati con essi. Il livello di indagine alla scala di materiale e componente dovrebbe essere una costante in tutti progetti di architettura, nel momento in cui nel progetto definitivo si esplicitano i requisiti tecnologici e si definiscono i possibili materiali e elementi costruttivi. Di solito la scelta della soluzione qualitativamente più efficace si basa sulle prestazioni strutturali e fisico-tecniche, oltre che sulla logica dei costi, spesso motivo di scelta; tuttavia in un'ottica di circolarità dei flussi nella vita utile di un manufatto diventa indispensabile basarsi anche sulle prestazioni di impatto ambientale, con una valutazione comparativa LCA, al fine di selezionare prodotti attenti al futuro del nostro ecosistema. Tale analisi LCA ha come oggetti alcuni materiali specifici per coperture trasparenti, tuttavia può essere letta in generale come una matrice procedurale replicabile per tutti i materiali da costruzione e subsistemi edilizi.

È quindi implicito come in questa fase l'analisi LCA abbia come interlocutori i progettisti, che sono sempre più chiamati a porre attenzione alle prestazioni e alle proprietà fisico-tecniche dei materiali scelti, fin dalle prime fasi del progetto, verso una previsione del consumo di materia e energia prima della costruzione dell'edificio, sommata alle strategie per il risparmio energetico nella fase d'uso dell'edificio.

Questo studio include un'ultima parte di confronto e verifica delle scelte fra le coperture trasparenti di due complessi residenziali attualmente in uso, al fine di far comprendere meglio come un'analisi LCA, se preventiva e non di verifica, consenta di valutare l'efficacia di una scelta progettuale e a esiti costruttivi, oltre che formali, e successivamente operativi differenti in uno dei due casi presi in esame. Infatti, se tra i paradigmi progettuali della copertura trasparente nelle due residenze considerate vi fosse stata la leggerezza quale strategia per ridurre la materia non necessaria alle funzioni strutturali, e per contenere i consumi di energia e le emissioni nella fase di produzione, la forma della copertura progettata sarebbe stata diversa in uno dei due casi. Tecnicamente nella procedura LCA questa fase viene chiamata analisi di sensibilità, al fine di valutare gli esiti dell'analisi LCA preventiva e di orientare e ottimizzare le scelte da compiere e le peculiarità su cui agire per un miglioramento del costruito, attento agli impatti ambientali. Anche quest'ultima fase è rivolta ai progettisti che, seguendo tale procedura, possono preventivamente valutare il sistema costruttivo e la soluzione tecnica più consona al processo operativo in fase d'uso dell'edificio: scelte tecnologiche efficienti nella forma, nella struttura, nelle prestazioni ambientali e sulla salute dell'uomo allungano la loro funzionalità a un medio e lungo periodo.

Ripercorrendo quanto detto, gli interlocutori della prima parte di questo scenario applicativo sono la produzione, quindi l'industria chimica, i produttori di film polimerici e le aziende di confezionamento e assemblaggio dei componenti pneumatici, e quelli della seconda e terza parte sono i progettisti.



Con riferimento alla sequenza delle fasi della procedura di valutazione LCA, approfondita nel capitolo 2, tale studio contempla le fasi di: a. Definizione degli scopi, dei confini del sistema e dell'unità funzionale, b. Analisi di inventario, c. Analisi degli impatti tramite la classificazione e la caratterizzazione del danno.

I danni ottenuti dall'analisi di inventario vengono caratterizzati secondo gli indicatori ambientali previsti dal metodo EPD 2007 (*Draft version*) 1.02, strutturato secondo quanto indicato nel documento del *Swedish Environmental Management Council (SEMC)* "*Revision of the EPD® system into an International EPD®*" dentro il software Sima Pro 7.1. In questo caso, i danni ambientali non sono stati contestualizzati tramite pesatura, accorpando i valori di impatto dei sei indicatori della caratterizzazione in punteggi singoli a mo' di classifica per ogni elemento e sistema costruttivo valutato (i quattro materiali nella fase 2 e i due edifici nella fase 3): da un lato il metodo EPD 2007 non prevede la pesatura, dall'altro le finalità dello studio intendono disporre di una valutazione oggettiva, non calata in uno specifico contesto di riferimento, come invece avviene per alcuni metodi di valutazione, come vedremo in seguito nel capitolo 5. È stata tuttavia impostata a livello qualitativo un'analisi di sensibilità e miglioramento rispetto ai risultati di impatto ambientale ottenuti.

Lo studio ha indagato le seguenti fasi del ciclo di vita: pre-produzione (Acquisizione delle risorse, trasformazione delle risorse in materiali ed energia), produzione fuori opera (lavorazione delle materie prime in semilavorati, produzione di componenti edilizi, assemblaggio di componenti e sub-componenti) e messa in opera.

In mancanza di una banca dati LCI di materiali per l'edilizia italiana, si è consultata la banca dati svizzera EcolInvent per i processi di produzione dei materiali.

### **3.2. Il ciclo di vita dei cuscini pneumatici in etfe per l'involucro trasparente**

In un contesto in cui l'industria chimica avanzata, le bio- e nano-tecnologie consentono di gestire e miniaturizzare la forma dei prodotti fino all'atomo, in cui la manipolazione di strutture molecolari e macromolecolari dei materiali naturali e artificiali ha dimostrato la possibilità di inventare nuovi materiali (Zanelli, 2009), una nuova generazione di polimeri offre un enorme potenziale di sviluppo e diffusione nella progettazione architettonica e nel settore edile. In particolare, l'applicazione di componenti tecnologici avanzati per la lavorazione delle plastiche e la produzione di pellicole polimeriche ultra leggere trasparenti, della famiglia dei fluoropolimeri è sempre più diffusa e collaudata, fino a renderle materiali alternativi al vetro.

Parallelamente come risposta tecnica alla necessità di efficienza energetica in edilizia e di riduzione degli impatti ambientali del settore delle costruzioni (come consigliato nella Direttiva 2002/91/CE), si è diffusa una tendenza progettuale che prevede di sfruttare corti interne e spazi verdi tra edifici esistenti o di costruire nuovi edifici con spazi aggiuntivi quali ammortizzatori termici tra l'ambiente esterno e interno, in entrambi i casi realizzando dei sistemi di chiusura trasparenti. Le strutture leggere e tutti i materiali trasparenti tradizionali rispondono a queste funzioni, ma recentemente molti progettisti stanno cominciando a utilizzare i fogli di etfe (etilene tetra fluoro etilene), come materiale innovativo ultraleggero per involucri trasparenti e bioclimatici (Moritz, Barthel, 2002). Nella vasta gamma dei polimeri l'etfe, un copolimero modificato sintetizzato negli anni Quaranta quando un brevetto statunitense venne approvato all'azienda Dupont, è preferito ad altre plastiche per l'estrema leggerezza e la trasparenza: consente una penetrazione pari al 95% dei raggi

solari e totale dei raggi UV (Rudorf-Wittrin, 2007). L'interesse per questo nuovo materiale nel ambito dell'architettura è emerso nel periodo della prima crisi petrolifera degli anni Settanta, quando l'azienda Hoechst sviluppò i primi fogli estrusi in etfe e li sottopose a test di durabilità agli agenti atmosferici, inviandoli nei centri di ricerca specifici in Arizona e in Germania (Moritz, Barthel, 2002). La tecnologia dei cuscini pneumatici in etfe (LeCuyer, 2008) si è sviluppata principalmente come sostituzione al vetro per le serre botaniche, per le coperture di piscine e di altre strutture sportive, ma recentemente l'uso di questo sistema è in crescita anche per realizzare coperture o facciate di edifici con funzioni permanenti, per esempio di biblioteche, scuole, uffici e anche complessi residenziali (Schwitter, 1994). Sono ormai ben note le sue caratteristiche meccaniche, ottiche e di comportamento al fuoco, tuttavia le prestazioni termiche e ambientali di tali materiali da costruzione non sono così chiaramente definite.

In Europa molte ricerche in atto hanno l'obiettivo di definire l'eco-profilo dei film fluoropolimerici, per disporre di complete informazioni sulle loro prestazioni.

Per le materie plastiche più comuni sono già disponibili i profili ambientali. Nella famiglia dei fluoropolimeri, l'unico riferimento reperibile in letteratura riguarda il diagramma di flusso relativo alla produzione del ptfe, meglio noto come teflon, e il suo impatto ambientale, dettagliate nella banca dati svizzera Ecoinvent V1.02: tuttavia questo materiale, di conseguenza il suo processo di produzione, differiscono sensibilmente da quelli dell'etfe. In merito all'etfe sono esigui gli studi che hanno cercato di approfondire la sua eco-efficienza e il suo contenuto energetico (*embodied energy*), definito come l'energia usata nella lavorazione dei materiali, nonché nella produzione di semilavorati e prodotti; i dati e i risultati raccolti divergono e non è disponibile un'informazione certa per il progettista che intende valutarne le prestazioni a confronto con altri materiali edilizi. L'unica informazione ambientale disponibile è di tipo qualitativo e paragona le prestazioni del fluoropolimero con quelle del vetro (Le Cuyer, 2008; Pearson, 2000). I riferimenti da letteratura di tipo quantitativo si limitano a indicazioni sull'indicatore dell'energia incorporata EE per la produzione del fluoropolimero: tuttavia vi sono dati contrastanti da fonti diverse e non risultano chiari i confini del sistema considerati nell'analisi degli impatti ambientali per poter effettuare un confronto o disporre di quantità attendibili (LeCuyer, 2008; Pearson, 2000). Facendo riferimento agli studi di Robinson-Gayle et al. (2001) la quantità di energia incorporata per la produzione di 1 kg di film in etfe è 26,5 MJ; nel testo di Michael Ashby (2007) un grafico mostra un valore stimato di 100-120 MJ/kg; infine Fernandez (2006) indica sempre in un grafico 120-130 MJ/kg di energia incorporata per la produzione di 1 kg di etfe, ma in tutti i casi i confini del sistema LCA non sono chiaramente specificati.

### 3.2.1. Il ciclo di vita del film fluoropolimerico etfe

Le informazioni tecniche proposte sono finalizzate a fornire al lettore una spiegazione sistematica del ciclo di vita del nuovo fluoropolimero e del suo sistema costruttivo, offrendo un contributo di sistematizzazione delle informazioni sommarie da letteratura.

**Materie prime e polimerizzazione** - materie prime di base nell'etfe sono la fluorite ( $\text{CaF}_2$ ), l'idrogeno solfato ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), il cloro, il metanolo e l'etilene. La fluorite è un minerale, estratto spesso insieme alla pietra calcarea. Questa insieme al solfato di idrogeno genera l'acido fluoridrico (HF). Cloro e metanolo formano il triclorometano ( $\text{CHCl}_3$ ). Quest'ultimo insieme all'acido fluoridrico è usato per fare il clorodifluorometano, che dà per pirolisi a

700 °C il tetrafluoroetilene TFE ( $\text{CF}_2 = \text{CF}_2$ , un gas incolore e inodore). Ad eccezione della fluorite, le materie prime dell'etfe provengono dal cracking della nafta. La polimerizzazione tra TFE e copolimero di etilene produce l'ETFE. Questo processo avviene a circa a 125 °C e ad una pressione preferibilmente da 0,5 a 3 MPa, come indicano presso lo *US Patent no.11/430054* (Aida, Funaki, 2008). Etilene e clorodifluorometano sono utilizzati come componenti di base nella produzione dei fluoropolimeri (il loro rapporto in peso molare, circa rispettivamente 25% e 75%, è il segreto delle prestazioni fisiche e della trasparenza del film in etfe). I sottoprodotti di questo processo sono l'esafluoropropilene (HFP, in un rapporto molare da 1,5 a 10%), un regolatore di resistenza meccanica, e il perfluoro(alkil vinil etere) (PFAV, in un rapporto molare da 0,1 a 1%), un regolatore di trasparenza. Il processo di polimerizzazione utilizza acqua e disperdenti, per fornire una migliore emulsione. Il metodo di polimerizzazione usato è in soluzione unica, in cui i monomeri polimerizzano grazie ad un iniziatore di polimerizzazione, un agente di trasferimento di catena e un mezzo di polimerizzazione. L'etfe non contiene additivi per migliorare le sue prestazioni nella fase di servizio. Come sostiene AGC Chemicals Europe (2008), gli additivi, come i plastificanti, i ritardanti di fiamma e gli antiossidanti, potrebbero dar luogo a un aumento degli impatti ambientali in un tempo successivo alla produzione, durante la vita utile o potenzialmente a fine vita dei prodotti.

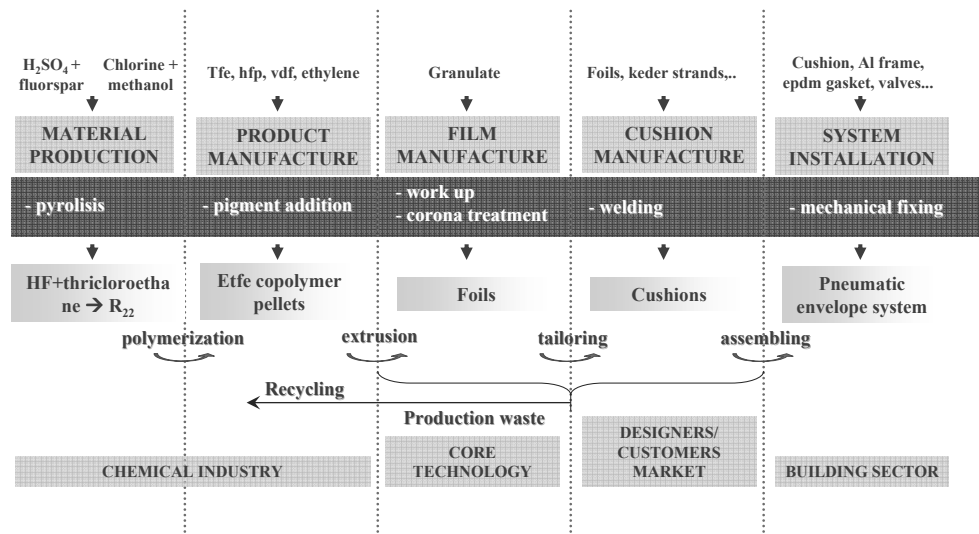


Fig. 3-1: Diagramma di flusso per la catena di produzione dell'etfe e dei cuscini pneumatici (Fonte: Monticelli, 2009)

Qualcosa circa gli effetti ambientali degli iniziatori di polimerizzazione e degli agenti di trasferimento di catena è riscontrabile in letteratura. Il Protocollo di Montreal (che si occupa del controllo e della regolamentazione delle sostanze assottiglianti lo strato d'ozono) ha stabilito che l'etilene e il clorodifluorometano, usati come materie prime chimiche e trasformati nel processo di polimerizzazione, vengono sottratti dall'ambiente: in questi casi il loro potenziale di assottigliamento dello strato di ozono equivale a zero. Per questo

motivo, il protocollo esclude specificamente queste sostanze dal relativo regolamento (Società dell'industria plastica, 2005). Ma l'etfe è sintetizzato tramite emulsionanti, agenti iniziatori di sintesi, agenti chimici per il trasferimento molecolare di catena, che generano effetti negativi nella fase di produzione della resina fluoro polimerica, rilasciando gas nocivi. Circa gli effetti ambientali di tali sostanze esistono alcune apposite recenti specifiche. Gli ingredienti pericolosi, correlati con il potenziale di riduzione dello strato di ozono, sono gli iniziatori di polimerizzazione PFOA (acido perfluorottanoico, chiamato anche "C8", un emulsionante nella polimerizzazione), e gli agenti di trasferimento di catena.

Dall'indagine è emerso come sia compito dell'industria chimica il miglioramento dell'eco-profilo dei fluoro polimeri, che opera con il *cracking* del petrolio per ottenere i monomeri polimerici di base: relativamente all'energia incorporata in questi materiali, questa fase iniziale del processo, oltre al fatto di rilasciare gas nocivi, richiede enormi quantità di energia. L'industria chimica, tuttavia, sta già provvedendo a ottimizzare la filiera predisponendo impianti sofisticati che consentono di ridurre le emissioni di gas chiudendo il ciclo di produzione, catturando e riusando gli stessi nel processo produttivo. Inoltre le maggiori aziende chimiche produttrici dei granuli fluoropolimerici e fluorotelomerici stanno lavorando dal 2006 per trovare una sostanza sostituto degli agenti chimici nocivi PFOA, su invito della Agenzia di Protezione Ambientale americana (*US Environmental Protection Agency*) di impegnarsi in un programma volontario con alcuni obiettivi globali, da raggiungere entro il 2015: l'obiettivo è quello di lavorare per ridurre e eliminare definitivamente le emissioni nella fase di polimerizzazione e il contenuto di PFOA nei prodotti, i loro precursori e i prodotti chimici correlati (Commissione EU, 2007). Gli esiti finora raggiunti dal programma sono stati presentati a Ginevra nel febbraio 2009 in un convegno internazionale: ristrutturando le tecnologie e i processi produttivi e rivedendo le materie prime impiegate, alcune aziende hanno recentemente già individuato un nuovo agente emulsionante alternativo a pari prestazioni, che riduce gli effetti negativi dovuti alle emissioni nell'ambiente<sup>2</sup>.

**Estrusione del film** - Il prodotto della polimerizzazione è una resina di etfe commercializzata sotto forma di polvere o compressa in pellets. I pellets sono riscaldati alla temperatura di rammollimento di 380 °C e il film può essere estruso. Il prodotto estruso, passando tra i rulli, è un film di spessore di 0,05-0,3 mm e di larghezza 150-220 cm. Il film, dall'estrusore, esce pronto per essere arrotolato su tubi di cartone per l'imballaggio e la consegna alle aziende di confezionamento dei cuscini pneumatici. Dopo l'estrusione è possibile stampare delle serigrafie sulla superficie della pellicola, al fine di regolare e riflettere la radiazione solare e di calore. Il processo di stampa delle serigrafie si chiama trattamento a Corona e tratta la parte superficiale della pellicola in etfe con una scarica elettrica ad alta intensità che consente di aprire la struttura molecolare della superficie tipicamente antiadesiva del film, creando quasi un legame chimico tra gli inchiostri e il fluoropolimero (Lili et al., 2005,

---

2. Si tratta di *Dyneon Adona emulsifier*. PFOA, in particolare, il suo sale di ammonio, APFO, ha svolto un ruolo storico come aiuto polimerizzazione nella fabbricazione di talune fluoropolimeri. Dyneon, una società di 3M, è stata per prima leader del settore con l'introduzione del suo nuovo emulsionante, Dyneon™ Emulsionante Adona™, che elimina l'impiego di perfluorottanoato di ammonio (PFOA), un sale derivato da acido perfluorottanoico (PFOA), completamente dalla sua produzione di fluoropolimeri. Con lo sviluppo della sua nuova tecnologia emulsionante, Dyneon, dal 2009, è sulla buona strada per essere il primo a raggiungere l'obiettivo di eliminare l'uso di PFOA, sette anni prima del (*EPA*) 2010/15 PFOA Stewardship obiettivo del programma della *US Environmental Protection Agency*. L'emulsionante Dyneon™ Adona™ è adatto per essere recuperato, riciclato e riutilizzato usando una tecnologia avanzata di contenimento esistente (Santoro, 2008).

Zanelli et alii, 2011). Il pigmento comunemente usato è la polvere di alluminio, per alcuni casi particolari anche di rame.

**Confezionamento dei cuscini** - Visitando un'azienda di confezionamento di involucri a cuscini di etfe, è facile rendersi conto di come la loro fabbricazione assomigli a un lavoro di sartoria o di confezionamento di vele nautiche, con l'aggiunta di un alto contenuto tecnologico. Dai rotoli il foglio viene tagliato secondo le forme progettate, grazie ad una lama rotante a controllo numerico CNC, guidate dai dati di input digitale. I fogli sono saldati tra loro a caldo su un tavolo per formare cuscini a più fogli. Il processo di saldatura, in realtà basata su un processo in continuo, è fatto da una tipologia di saldatura a barra calda, la cui larghezza è da 6 a 10 mm (dimensione che risponde adeguatamente al carico strutturale in fase d'uso). La temperatura di saldatura è di circa 300-325°C, a seconda della tecnologia di saldatura più appropriata. Nella fase di saldatura, effettuata con una apposita macchina per fluoro polimeri, è indispensabile una corretta regolazione degli input di temperatura di saldatura, quindi di calore, di tempo di saldatura e tempo di raffreddamento (Rudolf-Wittrin, 2007). Il bordo cuscino viene dotato di un Keder, solitamente un trefolo di filamenti in polipropilene, incorporato nel cuscino durante il processo di saldatura. Infine le valvole di pompaggio dell'aria vengono saldate sulla superficie dei fogli. I cuscini confezionati vengono piegati, evitando, ove possibile, la formazione di rughe nel film, e messi in contenitori di legno, pronti per essere spediti.

I cuscini pronti per l'installazione in cantiere richiedono un decimo dell'energia di trasporto se confrontato con struttura simili in vetro, poiché il loro peso a parità di superficie di involucro è decisamente inferiore rispetto a quello del vetro.

**Fase di installazione** - I cuscini pneumatici vengono messi in opera su telai in alluminio estruso. Gli elementi estrusi in alluminio hanno incorporati il taglio termico, le guarnizioni in EPDM e un sistema interno di drenaggio secondario, consentono il fissaggio lineare e assicurano la tenuta stagna della struttura con l'integrazione di guarnizioni in neoprene. Il movimento delle coperture e degli involucri in etfe è smorzato dalla flessibilità insita nel film sottile, quindi le guarnizioni non vengono sollecitate. Di conseguenza, la durata di vita di tali elementi di tenuta è molto più lunga delle guarnizioni tipiche delle coperture in vetro, che devono resistere al movimento termico e strutturale tra vetro e giunzioni in alluminio.

Questi cuscini prefabbricati sono trasportati sgonfi al sito di installazione. Equipaggiamenti e personale specializzati assicurano la messa in opera e l'installazione dei cuscini pneumatici. In cantiere i cuscini vengono spiegati, assemblati ai loro telai in alluminio (fissati alla struttura d'involucro primaria), collegati al sistema di gonfiaggio (un sistema ad anello principale o radiale con piccole tubi connettori aderenti a ciascun cuscino tramite valvole pre-saldate) e gonfiati per stabilizzare l'intero involucro e prevenire danni (pieghe, vento). La messa in opera è molto rapida e richiede poco tempo.

Per comprendere la peculiarità di questo innovativo sistema di involucro, anche dal punto di vista ambientale, rispetto a sistemi con materiali tradizionali, è necessario considerare le altre fasi del ciclo di vita del sistema messo in opera in un edificio, oltre alla fase "pre-consumo".

**Fase d'uso** – Una copertura in etfe è realizzata a cuscini con più fogli trasparenti, gonfiati con una piccola pompa ad una pressione di 250-400 Pa e rabboccati a intermittenza. Il pompaggio dell'aria avviene per mezzo di due ventole, collegate ai cuscini da tubi flessibili: una sempre attiva e la seconda permanentemente in *stand by*, entrambe alimentate da motori elettrici a bassa potenza (una potenza di 100 Watt per la prima e di 200 Watt

per la seconda). La ventola principale funziona solo il 50% del tempo con un consumo di energia pari a 50 Watt. Esse sono dotati di un manometro e un interruttore elettronico che controllano la pressione dell'aria, permettendo loro di funzionare in modo automatico e insufflare aria nelle camere d'aria tra i fogli di etfe di ogni cuscino, se la pressione scende al di sotto del livello richiesto. Ogni unità di ventilazione riesce a mantenere la pressione a 1000 m<sup>2</sup> di involucro o copertura. Di conseguenza va sottolineato come tale sistema d'involucro richieda energia durante l'uso per funzionare, rispetto ad un sistema vetrato. Tuttavia uno svantaggio del vetro, in particolare nel caso dei doppi vetri, rispetto al sistema a cuscini di etfe è il decadimento prestazionale termico durante la vita utile: presupponendo una installazione a regola d'arte i cuscini pneumatici in etfe mantengono le caratteristiche termiche iniziali, grazie al sistema di pompaggio in continuo, mentre i doppi vetri, dopo 15-20 anni, si danneggiano lentamente, a causa della perdita di adesività tra le lastre di vetro e il distanziatore plastico, determinando umidità interstiziale e perdita del sotto vuoto. Ciò implica una conseguente sostituzione dei vetri doppi dopo 20 anni di servizio.

Una caratteristica rilevante di tale sistema è la durabilità tipica del materiale fluoro polimerico (garantito per circa 40 anni dalle aziende produttrici e installatrici): la necessità di sostituzione è bassa, riducendo quindi il consumo di risorse e energia durante la vita utile dell'edificio dovute a eventuali manutenzioni e sostituzioni. La Mangrove Hall (Burgers' Zoo di Arnheim, Paesi Bassi) (fig. 3-2), uno dei primi esempi di applicazione dei cuscini in etfe in architettura, eretta nel 1982, e anche al Chelsea and Westminster Hospital (fig. 3-3), costruito a Londra nel 1990, sono due esempi significativi di tale peculiarità del materiale fluoropolimerico.



*Fig. 3-2: Mangrove Hall (Burgers' Zoo di Arnheim, Paesi Bassi) è uno dei primi esempi di applicazione dei cuscini in etfe in architettura (1982) (Fonte: LeCuyer, 2008).*



*Fig. 3-3: copertura dell'atrio centrale del Chelsea and Westminster Hospital, Londra (1990), dettagli di alcuni difetti emergenti dopo 20 anni d'uso senza particolare manutenzione (Fonte: foto dell'autore).*

Fino al 2009, tali manti di copertura trasparenti non sono mai stati sostituiti e il livello di trasparenza è ancora buono; ciò significa una durata di vita, nel primo caso, di 28 anni e, nel secondo caso, di 22 anni ad oggi. La copertura della Mangrove Hall è stata sostituita nel 2009, non tanto per il degrado del sistema, quanto per un danno accidentale provocato da una forte precipitazione di grandine di grosse dimensioni, che ha forato alcuni film esterno dei cuscini: i tecnici dell'etfe sarebbero stati in grado di riparare le parti danneggiate, è stata una scelta della proprietà di operare una sostituzione completa. La copertura dell'atrio del Chelsea and Westminster Hospital è attualmente in uso, è in buone condizioni, tuttavia emergono in alcuni punti alcune infiltrazioni d'acqua, in parte dovute all'effetto di condensa. I confezionatori e installatori di tale copertura (Vector Foiltec, Bremen, Germania) hanno giustamente osservato che queste conseguenze sono in parte dovute a errori di messa in opera negli anni Novanta, che si sono ripercossi fino ad oggi, e ad un'applicazione della tecnologia al tempo ancora acerba e in via di definizione.

Tornando alle caratteristiche del materiale, nella fase di uso la proprietà di anti-adesività del film in etfe riduce al minimo i cicli di pulizia delle superfici dei cuscini; i componenti che vanno ciclicamente mantenuti e puliti sono i telai in alluminio che contengono i cuscini, poiché sono luogo di raccolta della sporcizia, che scivola ai lati dalle superfici curve degli stessi. Grazie alle visite sul campo di casi di applicazione e di uso dell'etfe per involucri pneumatici, quali i lucernari della copertura dell'aeroporto Stansted di Londra (progetto Norman Foster & Partner, 1991) (fig. 3-4), le pensiline di sosta dell'autostazione presso l'aeroporto Stansted di Londra (progetto di Norman Foster & Partner, 2007) (fig. 3-5), la cupola della Regensburg ad Hannover (progetto Gordon Wilson, 1999) (fig. 3-6) e l'edificio residenziale Social Housing nel quartiere Kronsberg ad Hannover (progetto Willen Associates Architekten, 1998) (fig. 3-7), è possibile affermare, con testimonianza di rilevamenti fotografici e visivi, come nella maggior parte dei casi i telai in alluminio appaiono più sporchi rispetto alla superficie in etfe. In alcuni casi i cuscini di etfe sono messi in opera direttamente vicino a lastre di vetro e l'aspetto del vetro è meno trasparente rispetto al ETFE a causa della superficie sporca e grassa, non autopulente. Il vetro ha bisogno di più cicli di pulizia rispetto ai cuscini in etfe.



*Fig. 3-4: lucernari della copertura dell'aeroporto Stansted, Londra (progetto Norman Foster & Partner, 1991) (Fonte: foto dell'autore).*





*Fig. 3-5: pensiline di sosta dell'autostazione presso l'aeroporto Stansted di Londra (progetto di Norman Foster & Partner, 2007) realizzate con cuscini pneumatici in etfe (Fonte: foto dell'autore).*



*Fig. 3-6: cupola a cuscini pneumatici di etfe della Regenswald ad Hannover (progetto Gordon Wilson, 1999) (Fonte: foto dell'autore).*



Fig. 3-7: edificio residenziale Social Housing nel quartiere Kronsberg ad Hannover (progetto Willen Associates Architekten, 1998) (Fonte: foto dell'autore).

**Fine della vita utile** – È stato ulteriormente oggetto di indagine lo stato dell'arte riguardo la pratica di riciclaggio dell'etfe come alternativa alla messa in discarica, essendo un materiale difficilmente biodegradabile: è riciclabile e una catena di riciclaggio è già operativa. In Germania esistono già opportunità commerciali che raccolgono i rifiuti di produzione o partite di etfe usato e dismesso, per poi riprocessarli in altri componenti di etfe, come valvole o tubi per il sistema di pompaggio dell'aria. In Italia una azienda di estrusione del film fluoropolimerico pratica il riciclaggio dei rifiuti di produzione e li reimmette nella filiera per estrarre nuovo film trasparente.

La quantità di rifiuti derivanti dalle fasi di produzione e di polimerizzazione non è molta (3-4 kg di pellicola etfe al giorno). La maggiore quantità di rifiuti di etfe è stata recentemente raccolta e recuperata dal sistema di copertura dell'edificio Mangrove Hall a Arnheim per essere riciclata. La copertura è stata smontata e sostituita e il vecchio film è stato predisposto al processo di riciclaggio: la quantità dei rifiuti ammonta a ben 3 tonnellate.

Un limite della pratica di riciclaggio dell'etfe si presenta quando i film sono serigrafati, attualmente non esiste una tecnologia per separare l'inchiostro dall'etfe. Lo stesso limite appartiene anche al vetro, quando è rivestito con i metalli per la produzione di vetri doppi basso emissivi, perché alla fine del ciclo di vita la separazione dei metalli dal vetro è molto difficile. In generale per il vetro una catena di riciclo è attiva da anni. Nel caso di vetro laminato non è possibile riusare il vetro di scarto nella stessa produzione, poiché il vetro riciclato non presenta la stessa trasparenza del vetro da materie prime.

### 3.2.2. L'energia incorporata nel ciclo di produzione

Il presente saggio offre una procedura di indagine della stima del valore di energia incorporata, per comprendere quale sia la fase a maggior contenuto energetico nella filiera di produzione del sistema d'involucro a cuscini in etfe, e valuta anche altri indicatori ambientali.

Dopo la ricostruzione del ciclo di vita del film e dei cuscini pneumatici in etfe, indispensabile per poter computare gli impatti ambientali, si è valutata la prestazione ambientale del materiale etfe secondo la procedura LCA, grazie all'elaborazione di preziosi dati primari sulla polimerizzazione e la produzione dell'etfe, ottenuti da alcune aziende manifatturiere di granuli, di film e di cuscini pneumatici e tramite fonti di letteratura, relative alle quantità di materiali in ingresso (*input*) nel processo produttivo e alle emissioni (in aria, acqua e suolo) (*output*). L'elaborazione ha previsto la definizione del diagramma dei flussi (*flow chart*), per poter calcolare l'eco-profilo.

<b>Granuli di ETFE</b>	<b>1</b>	<b>kg</b>
<i>Resources</i>		
Water, fresh	0.3	l
Water, river	195	l
Steam	5.4	kg
<i>Materials/fuels</i>		
Ethylene ETH U	0.3	kg
Chlorodifluoromethane, at plant/NL U	1.3	kg
Methanol, at regional storage/CH U	23	g
Sulphuric acid, liquid, at plant/RER U	32	g
Petrol, unleaded, at refinery/RER U	3	g
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW	5	MJ
Chemical plant, organics	4E-10	p
<i>Electricity/heat</i>		
Electricity, high voltage, at grid	10.4	MJ
<i>Emissions to air</i>		
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	0.007	kg
Methanol	0.0008932	kg
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	0.092417	kg
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	0.0008201	kg
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	1.151E-05	kg
<i>Waste to treatment</i>		
Disposal, refinery sludge, 89.5% water, to landfarming	0.0043888	kg
Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration	0.001223	kg
<b>Prodotto - semilavorato</b>		
<b>Foglio di ETFE calandrato</b>	<b>1</b>	<b>kg</b>
<i>Resources</i>		
<i>Materials/fuels</i>		
Granuli di ETFE	1	kg
<i>Electricity/heat</i>		
Calendering, rigid sheets/RER U	1	kg

Tab. 3-1: LCI del processo di produzione di un kilogrammo di granuli (materiale di base) e di un film (semilavorato) di etfe.

Le informazioni del diagramma dei flussi sono state sistematizzate grazie al supporto del software SimaPro V7.1, che consente l'aggiunta nelle banche dati esistenti di nuove voci relative a nuovi materiali, con i rispettivi flussi e quantità di sostanze coinvolte. Quindi pragmaticamente è stata creata una nuova voce "etfe" con il diagramma dei flussi della produzione dell'etfe, inserendo in primo luogo le quantità delle materie prime, ottenute dai dati primari, e poi richiamando le voci corrispondenti a queste dalla banca dati Ecolinvent V1.02. Rispetto all'obiettivo primario di sistematizzare lo "stato dell'arte" delle prestazioni ambientali dell'etfe, i risultati di seguito presentati sono da considerarsi una assunzione passibile di futuri raffinamenti dei dati di input e output, prefigurando uno scenario di impatto ambientale migliorativo. La voce creata riguarda la fase di produzione dal reperimento delle materie prime per la polimerizzazione, alla polimerizzazione in granuli, all'estrusione del film e si riferisce alla fabbricazione di un kilogrammo di film. A seguire si è ricostruita la quantità di energia incorporata per produrre 1kg di film estruso per confezionare i cuscini pneumatici e approssimativamente ammonta a  $EE = 210 \text{ MJ/kg}$ , di cui:

- 173 MJ/kg imputabili alla fase di formazione dei monomeri di base, sostanze di output dal processo di cracking del petrolio e materie prime per la polimerizzazione dei fluorurati; nel caso dell'etfe sono i gas (etilene e R22) introdotti nel processo di polimerizzazione: l'80% di questa quantità viene dal processo di produzione del clorodifluorometano (dovuto all'uso di gas naturale e carbone durante il suo processo di creazione), che produce per pirolisi il tfe;
- 28 MJ/kg necessari per la polimerizzazione e la granulazione delle materie prime in pellets di resina di etfe; di tale quantità il 53% è il tasso di energia termica generata dal vapore, il 35% proviene da energia elettrica e il 12% da gas;
- 9 MJ/kg impiegati per il processo di estrusione dei granuli in film sottili.

Il film sottile, arrotolato su bobine, viene tagliato nella forma necessaria per confezionare il cuscino e accoppiato agli altre pellicole che, saldati insieme a caldo, formano il componente multi layer per le coperture pronto per essere gonfiato con l'aria, tramite sistemi di pompaggio e attraverso tubi di collegamento. I processi e i macchinari per questa lavorazione richiedono un quantitativo di energia molto più basso rispetto alle fasi precedenti, tale da essere trascurabile.

### 3.3. Obiettivo e contenuto della valutazione comparativa

Dopo la definizione del profilo ambientale dell'etfe e il suo inserimento nella banca dati dei materiali da costruzione, è stato possibile effettuare l'analisi LCA comparativa delle prestazioni ambientali tra il film in etfe e altri materiali trasparenti, di uso più corrente in architettura. Quindi il caso di studio si è posto due obiettivi:

a. il primo di valutare il ciclo di vita di quattro materiali trasparenti alternativi impiegati quali elementi di copertura o di involucro a parità di prestazioni termiche e strutturali con lo scopo di conoscere e comparare i rispettivi profili di impatto ambientale alla scala del materiale e alla scala del prodotto da costruzione;

b. un secondo livello di comparazione dell'impatto ambientale di due tipologie di copertura trasparente, di cui una realizzata con una tecnologia tradizionale in vetro e la seconda il sistema di nuova generazione in cuscini pneumatici. La metodologia LCA è stata applicata a due casi reali di edifici attualmente in uso, entrambi costruiti circa 10 anni fa. Per questo secondo obiettivo si sono calcolati i flussi di materiale e le prestazioni ambientali di

tutti i componenti di entrambi i subsistemi di copertura, considerando la struttura portante, i telai, le guarnizioni, etc.. Lo scopo di questa seconda fase è consistito nell'esemplificare una analisi LCA comparativa tra due progetti, nel comprendere quali componenti del subsistema di copertura determinino il maggior impatto ambientale, indagandone le ragioni, e nel suggerire una ottimizzazione progettuale al fine di perseguire la riduzione di consumo di materiale impiegato e una maggior leggerezza della struttura.

### 3.4. Il metodo di valutazione di impatto ambientale

La metodologia LCA è stata scelta per analizzare gli aspetti ambientali dei casi di studio scelti e si struttura in tre fasi, dopo la determinazione degli obiettivi dell'indagine: l'inventario di sostanze e materiali coinvolti, la valutazione dell'impatto e l'analisi dei miglioramenti (Rice et al., 1997). L'analisi di inventario identifica e quantifica gli ingressi delle risorse e dell'energia, nonché le uscite, i rifiuti ed emissione del sistema per quanto riguarda l'unità dei componenti o di processo. Tutti i processi di produzione dei materiali da costruzione coinvolti nel confronto seguente sono estratti da voci del database svizzero Ecolnvent, al fine di mantenere un'uniformità di informazioni nell'analisi.

La valutazione comparativa dei profili ambientali, dapprima tra i quattro componenti d'involucro trasparenti e, in seguito, tra il sistema pneumatico in etfe e la copertura vetrata è stata effettuata con il metodo EPD 2007 contemplato nel software SimaPro V7.1, che ricalca esattamente le indicazioni di caratterizzazione e pesatura degli impatti e gli indicatori ambientali della norma EN 21390 EPD, standard europeo per la dichiarazione ambientale di prodotto (*Environmental Product Declaration*). I risultati riportano le quantità relative a: potenziale di riscaldamento globale ( $\text{kgCO}_2\text{eq.}$ ), potenziale di riduzione dello strato di ozono ( $\text{kgCFC}_{11}\text{eq.}$ ), ossidazione fotochimica ( $\text{kgC}_2\text{H}_4\text{eq.}$ ), potenziale di acidificazione ( $\text{kgSO}_2\text{eq.}$ ), potenziale di eutrofizzazione ( $\text{kgPO}_4\text{---eq.}$ ), energia incorporata (MJ).

Nell'analisi di sensibilità e di interpretazione, si è scelto di visualizzare in modo separato i risultati parziali per ogni componente dei due sistemi costruttivi (gli impatti della struttura primaria, di quella secondaria, dei telai, degli elementi trasparenti), al fine di esaminare e confrontare l'incidenza dell'impatto ambientale del ciclo di vita di ciascun componente.

### 3.5. LCA alla scala del materiale e confronto tra vetro, policarbonato, pvc crystal e etfe

Nel processo progettuale la fase esecutiva consiste nella definizione e nel dettaglio della tecnologia costruttiva e quindi dei sistemi costruttivi e nella scelta dei materiali; di conseguenza dal punto di vista dell'analisi LCA è importante, sempre in fase esecutiva, prevenire e valutare l'incidenza dell'impatto di un materiale rispetto al sistema costruttivo specifico in cui si inserisce. Il confronto degli impatti è stato fatto in prima istanza, considerando come unità funzionale il kilogrammo di materiale semilavorato e, di seguito, l'area di un metro quadrato di superficie coperta con i rispettivi componenti trasparenti, con l'obiettivo di comprendere come il peso specifico dei componenti determini esiti differenti rispetto al peso unitario di materiale, ovvero di indagare la differenza tra una valutazione comparativa alla scala del materiale semilavorato rispetto a quella alla scala dei componenti e dei sistemi costruttivi.


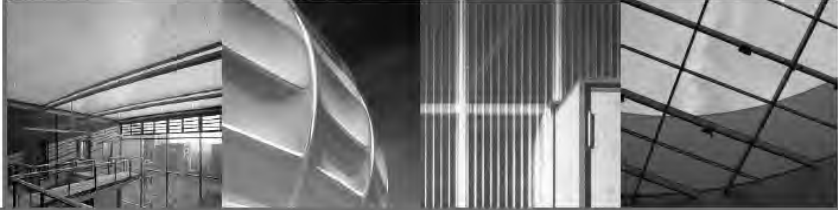
				
<b>MATERIALS</b> U.F. 1 kg	Extruded etfe film Density 1750 kg/m <sup>3</sup>	Calendared pvc foil Density 1450 kg/m <sup>3</sup>	Extruded pc sheet Density 1200 kg/m <sup>3</sup>	Tempered glass sheet Density 2500 kg/m <sup>3</sup>
				
<b>COVERING SYSTEMS</b> U.F. 1 m <sup>2</sup>	5 layer cushion made of etfe films Weight = 1,57 kg	2 layer cushion of pes/pvc - pvc crystal Weight = 2,32 kg	Multi wall pc panel system Weight = 3,6 kg	L.E. double glazing system Weight = 20 kg

Fig. 3-8: I quattro materiali semilavorati trasparenti e i relativi sistemi di copertura oggetto della comparazione (Fonte: Monticelli, 2009)

- I sistemi di copertura trasparenti comparati, rispondenti alla stessa funzione, sono:
- un sistema pneumatico con cinque film in etfe e quattro camere d'aria interposte,
  - un nuovo sistema traslucido costituito da un film interno intessuto di poliestere/pvc (pes/pvc) e da due strati esterni in un film trasparente di pvc crystal, con tre camere d'aria interposte (attualmente un solo esempio è stato realizzato con questo sistema e si tratta del padiglione Finmeccanica, progettato dall'arch. Stefano Gris a Fanborough nel Regno Unito, nel 2006);
  - un sistema di copertura a pannelli di polycarbonato alveolare;
  - un sistema a vetrocamera basso emissivo.

Nonostante la trasparenza, le caratteristiche chimiche e fisiche di questi materiali differiscono sensibilmente tra loro: scelti per la stessa funzione, non hanno lo stesso effetto ottico in un edificio. Il pes/pvc e il polycarbonato sono traslucidi, mentre i materiali più simili nelle prestazioni sono l'etfe e il vetro: sono trasparenti, con proprietà ottiche di trasmissione e riflessione molto simili, ma diversi per peso specifico e per configurazione in opera.

Nelle analisi seguenti il confine del sistema considerato contempla le fasi dal reperimento delle materie prime fino al prodotto confezionato e finito, pronto per la messa in opera (*from cradle to gate*).

### 3.5.1. Comparazione degli impatti ambientali di materiali semilavorati trasparenti

Il primo livello di analisi valuta le prestazioni ambientali per la produzione di quattro materiali semilavorati trasparenti e gli impatti sono confrontati rispetto al kilogrammo di peso di materiale. I casi a confronto sono:

- il film estruso in etfe, dalla sintesi dei granuli di resina etfe all'estrusione in film sottile;
- il film calandrato in pvc crystal, dalla sintesi dei granuli di resina pvc all'estrusione in

film sottile;

- il pannello di polycarbonato estruso, dalla sintesi dei granuli di polycarbonato all'estrusione del pannello alveolare multiparete;
- una lastra di vetro float temperata, dal reperimento del silicio, alla fusione e laminazione del vetro, fino alla tempra.

Dalla comparazione per unità di peso emerge come il profilo ambientale per la produzione del vetro float sia molto performante, rispetto agli altri tre processi produttivi. Riguardo agli impatti di effetto globale e agli impatti di acidificazione (*Acidification*) le emissioni nocive durante la fase di sintesi del polimero determinano l'elevato impatto ambientale dell'etfe rispetto agli altri elementi. Se si osservano i risultati numerici degli indicatori di impatto ambientale relativi all'ossidazione fotochimica (*Photochemical oxidation*) e all'eutrofizzazione (*Eutrophication*), la produzione di un'unità di peso di etfe ha sempre effetti peggiorativi sull'ambiente rispetto agli altri, tuttavia in un ordine di grandezza più vicino agli altri. Il valore di energia incorporata del foglio di etfe del peso di un kg, pari a 210 MJ/kg, è quasi doppio di quello del polycarbonato e circa dieci volte quello del vetro (19 MJ/kg), con valore più basso.

Categoria d'impatto	Global warming	Ozone layer depletion	Ossidazione fotochimica	Photochemical oxidation	Acidification	Non renewable, fossil, embodied energy
Unità	kg CO <sub>2</sub> eq	g CFC-11 eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	kg SO <sub>2</sub> eq	kg PO <sub>4</sub> --- eq	MJ eq
Film estruso di etfe	88.91	3.56	7.67	102.00	3.12	210.0
Film calandrato di pvc	2.31	0.00003	2.21	6.97	0.88	56.4
Pannelli estrusi di pc	8.06	0.00003	3.41	26.90	2.40	117.0
Vetro Temprato	0.85	0.0001	0.56	10.60	0.85	18.6

Tab. 3-2: Risultati della valutazione LCA della fase di produzione di 1 kg di componenti trasparenti da costruzione, svolta con il software SimaPro V7.1, secondo gli indicatori EPD.

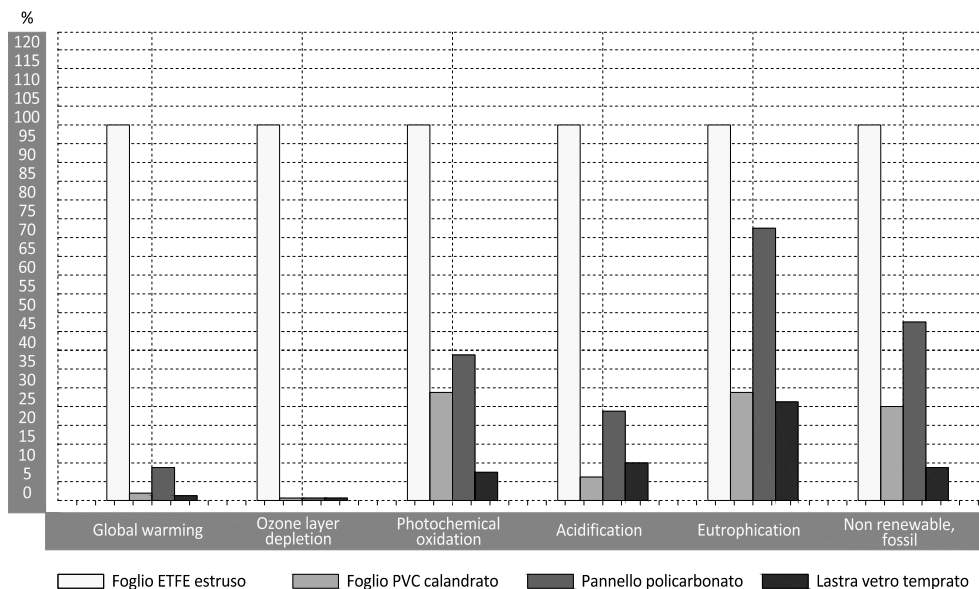


Fig. 3-9: Grafico del confronto dei risultati in % di impatto ambientale della LCA comparativa per la produzione di 1 kg di componenti trasparenti da costruzione, per sei categorie di impatto.

### **3.5.2. Comparazione degli impatti ambientali di un metro quadrato di superficie coperta trasparente**

Nella seconda analisi LCA si sono confrontati gli impatti ambientali dei materiali semilavorati con le quantità necessarie per costruire i sistemi di copertura trasparente (fig. 3-8).

In questo caso l'unità funzionale è una superficie coperta di un m<sup>2</sup>, in cui il sistema assicuri un valore di trasmittanza termica U di 1,20 W/m<sup>2</sup>K (entro il valore limite di riferimento cogente per l'uso di sistemi trasparenti nel D.Lgs. n. 192 e s.m.). Nella definizione dell'unità di confronto dei sistemi di copertura trasparente è stata verificata solo la prestazione di trasmissione del calore, mentre la caratteristica di trasmissione della radiazione solare e la trasparenza sono state trascurate. La prestazione termica dei cuscini in etfe e di quelli in pes/pvc è stata verificata secondo la procedura prevista dalla norma tedesca DIN 4108, di riferimento in letteratura rispetto ai sistemi pneumatici, che simula la trasmittanza termica di una parete a più strati orizzontali con una sequenza di film sottile posto in orizzontale e equidistanziato con camere d'aria interposte, di dimensione inferiore a 500mm, trascurando la forma curva cuscino. In questo modo il calcolo tende a sovrastimare la trasmittanza termica dei sistemi in etfe e pes/pvc, a causa della difficoltà nel determinare con precisione l'effetto della sezione curva dei cuscini, che riduce pressoché a zero la distanza tra i film dal centro verso il perimetro in prossimità dei telai. Il sistema vetrocamera raggiunge il valore previsto di trasmittanza grazie all'iniezione di gas argon nella camera d'aria e con la deposizione di un rivestimento metallico (argento, bismuto e nichel-cromo) su vetro float tramite un processo di *sputtering* catodico sotto vuoto. La forma progettata dei componenti trasparenti comparati è per natura dei sistemi tecnologici stessi diversa, di conseguenza il peso dei materiali necessario per costruire 1 m<sup>2</sup> di superficie trasparente varia notevolmente tra un sistema e l'altro, determinando un'inversione dei risultati ambientali. Per esempio, il cuscino a 5 layer in etfe ha un contenuto energetico, pari a 315 MJ/m<sup>2</sup>, inferiore agli altri sistemi, grazie alla leggerezza dei film e alla ridotta quantità di materiale necessario: scenario opposto dalla precedente valutazione in cui a parità di peso risultava altamente energivoro. Il valore di energia incorporata del sistema pes/pvc crystal (297 MJ/m<sup>2</sup>) è simile a quello del cuscino in etfe, la differenza sostanziale tra i due componenti sta nel livello di trasparenza: il primo è traslucido, il secondo è trasparente come il vetro. Anche a questa scala il confronto è particolarmente significativo tra il vetro e l'etfe. La fase di produzione della quantità di vetro, necessario a coprire una superficie di 1 m<sup>2</sup> per una prestazione termica di U = 1,2 W/m<sup>2</sup>K, è causa di emissioni pericolose, che hanno influenza maggiore sull'acidificazione (*Acidification*) e sull'eutrofizzazione (*Eutrophication*) delle acque e del suolo (danni ambientali locali, regionali) rispetto alle emissioni per la produzione degli altri sistemi in analisi: questo è dovuto alla fase di processo di produzione del vetro float (fig. 3-10). L'etfe mostra grandi impatti per le categorie del surriscaldamento del globo (*Global Warming Potential*) e del potenziale effetto serra (*Ozone Depletion Potential*), questioni ambientali di livello planetario, causati in tal caso dalle emissioni e dall'enorme quantità di energia richiesta per il processo di polimerizzazione dei monomeri per la formazione dei granuli di resina fluoropolimerica (come spiegato nel paragrafo 3.2.1). Il processo produttivo del sistema di copertura a pannelli in polycarbonato mostra minor impatto sull'effetto ambientale di acidificazione del suolo e delle acque rispetto agli altri tre sistemi. Il sistema pneumatico in pes/pvc invece ha effetti peggiori rispetto agli altri relativamente all'indicatore dell'effetto fotochimico, con risultato circa doppio rispetto agli altri.



Categoria d'impatto	Global warming	Ozone layer depletion	Ossidazione fotochimica	Photochemical oxidation	Acidification	Non renewable, fossil, embodied energy
Unità	kg CO <sub>2</sub> eq	g CFC-11 eq	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	kg SO <sub>2</sub> eq	kg PO <sub>4</sub> --- eq	MJ eq
Cuscino pneumatico in etfe	137	5.59	11.7	155.00	4.43	315.0
Cuscino pes/pvc e pvc crystal	19.2	0.00011	22.2	160	12.6	297.0
Pannello multicamera in pc	29.02	0.0001	12.28	96.80	8.60	420.8
Vetro doppio	16.98	0.0023	11.26	212.04	16.90	371.2

Tab. 3-3: Risultati della valutazione LCA della fase di produzione di 1 mq di componenti trasparenti da costruzione, svolta con il software SimaPro V7.1, secondo gli indicatori EPD.

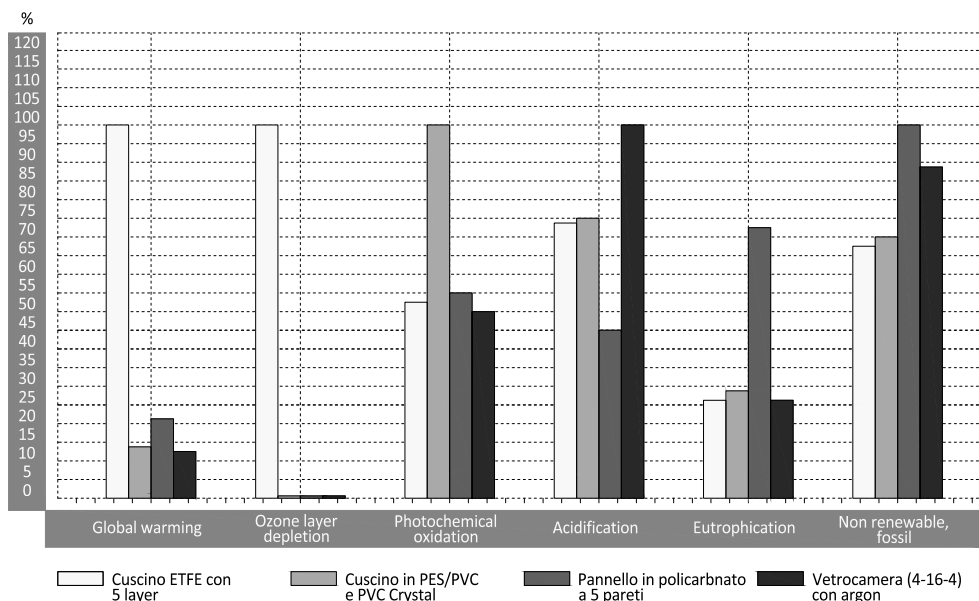


Fig. 3-10: Grafico del confronto dei risultati in % di impatto ambientale della LCA comparativa per la produzione di 1mq di componenti trasparenti da costruzione, per sei categorie di impatto.

I risultati delle due analisi fanno emergere come sia importante valutare le soluzioni tecniche non solo considerando la scala del materiale semilavorato, ma confrontando i componenti alla scala del sistema edilizio e, ancora meglio, il loro ruolo nell'edificio, pesando le effettive quantità di materiale impiegato. Infatti dal punto di vista della progettazione architettonica, non è significativo sapere che, in unità di peso, un materiale provochi un impatto diverso da un altro, ma molto più peculiare capire l'impatto generato dalle effettive quantità di materiale coinvolto nel sistema da mettere in opera in un edificio.

### 3.6. LCA alla scala del subsistema edilizio e confronto tra due sistemi di copertura trasparenti

Il secondo livello di analisi LCA di questo caso studio focalizzato sul tema della leggerezza mette a confronto due sistemi di copertura di edifici residenziali, oculatamente scelti poiché rispondenti a requisiti progettuali e tecnici simili, oltre a presentare una forma architettonica simile ed essere coevi. Si tratta, in un caso, di una copertura trasparente realizzata con i

cuscini pneumatici in etfe; è nel complesso Social Housing ad Hannover, progettato dallo studio Willen Associates Architekten e costruito nel 2000. L'altro esempio è costruito con un sistema a doppio vetro stratificato antisfondamento nel complesso residenziale Holzstrasse Building Complex a Linz, progettato dall'architetto Thomas Herzog e costruito nel 2001. Entrambi i complessi edilizi presentano alcune similitudini progettuali: si compongono di due corpi edilizi di quattro piani fuori terra il primo e di cinque piani il secondo, posti parallelamente tra loro, orientati sull'asse elioterminico Nord-Sud, con interposto uno spazio funzionale comune a giardino d'inverno e di "cuscinetto termico" tra l'ambiente esterno e gli alloggi interni, chiuso con un sistema di involucro trasparente. Durante i mesi freddi tale spazio funziona come una serra, accumula calore e contribuisce al risparmio energetico per i consumi di climatizzazione; durante il periodo estivo, attraverso le aperture regolabili in copertura, viene favorito il flusso naturale dell'aria calda verso l'alto, con l'agevolazione della ventilazione degli ambienti interni all'edificio, evitando il surriscaldamento.

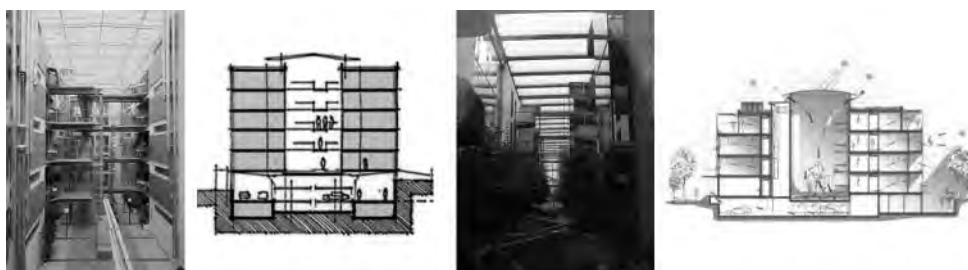


Fig. 3-11: Sistemi di chiusura orizzontale trasparenti del Complesso Holzstrasse a Linz e del Social Housing a Hannover (Fonte: Monticelli, 2009).

Nel caso in Social Housing di Hannover, la zona microclimatica è coperta da un sistema di copertura pneumatico a tre strati di film di etfe e due camere d'aria, composto dai seguenti elementi, oggetti dell'analisi comparativa LCA:

1. travi in acciaio HE 120B (struttura primaria),
2. struttura laterale in acciaio con una passerella a griglia metallica per l'ispezione del tetto (adeguatamente prevista in questo progetto, ma regolarmente necessaria in questo tipo di coperture),
3. telaio in alluminio di supporto del manto di copertura trasparente,
4. chiusura orizzontale a cuscini pneumatici di tre strati in etfe ( $U = 1,96 \text{ W/m}^2\text{K ca.}$ ) e da ultimo
5. serramenti apribili laterali in alluminio con vetri semplici (montati su un tradizionale telaio in alluminio per serramenti) (vedi fig. 3-16).

La superficie curva del rivestimento è determinata dalla forma del cuscino.

Nel complesso Holzstrasse, costruito nel 2001 a Linz, la zona di microclima è coperta da un sistema di vetri doppi stratificati, composto dai seguenti elementi, oggetto di confronto dell'analisi LCA:

1. trave a ponte in acciaio IPE 240 (struttura primaria),
2. travi in acciaio IPE 140 (struttura secondaria trasversale alla struttura principale),
3. serramenti in alluminio di supporto per le lastre vetrate del manto di copertura,

4. chiusura orizzontale in vetrocamera laminato 8-16-8 (con una trasmittanza termica  $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$  ca.) e infine
5. due serramenti laterali apribili ( $U = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  ca.), costituiti da un telaio in alluminio e da vetrocamera) (vedi fig. 3-17). Il tetto a capanna ha una leggera inclinazione, per il deflusso dell'acqua meteorica.

Si tratta di due tipologie a forma regolare a campata unica, con una sequenza di moduli trasparenti tra gli elementi strutturali in acciaio. Le dimensioni e le aree di tali coperture sono simili ma non uguali. Di conseguenza, al fine del confronto, gli impatti ambientali sono stati normalizzati sull'unità funzionale di  $1 \text{ m}^2$  di superficie coperta. Per l'analisi LCA degli impatti ambientali si sono computate le quantità di materiali impiegate per la realizzazione di un modulo singolo di ogni copertura, calcolato come l'area tra gli interassi di due elementi della struttura principale portante; i risultati dell'analisi di impatto ambientale sono stati valutati e poi normalizzati rispetto all'unità funzionale.



Fig. 3-12: Viste del Complesso Holzstrasse Building Complex a Linz, arch. Thomas Herzog, 2001 (Fonte: Studio Herzog).

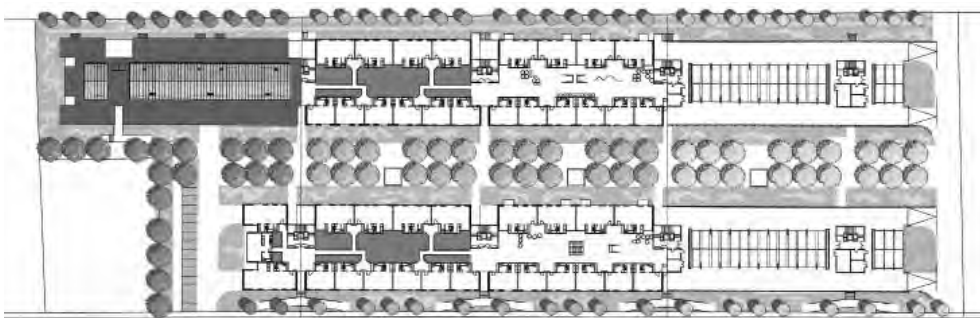
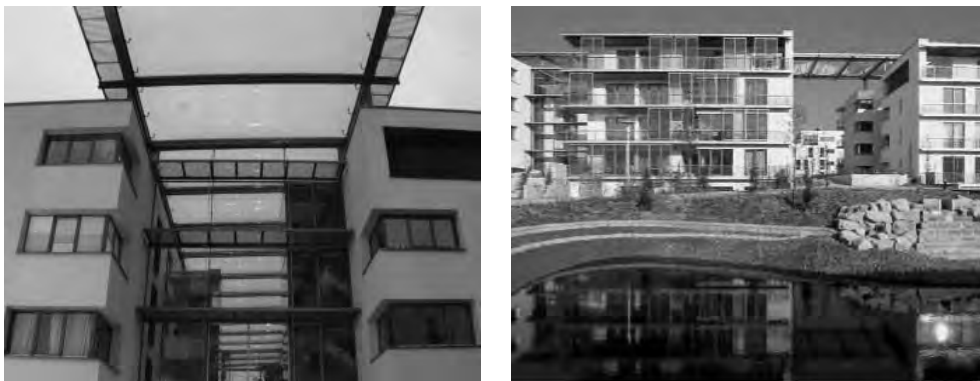
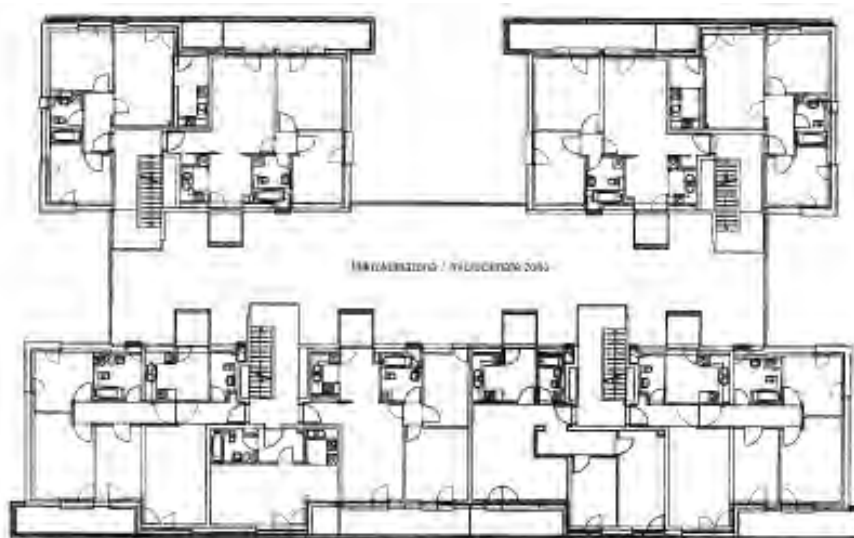


Fig. 3-13: Pianta del Complesso Holzstrasse Building Complex a Linz, progetto arch. Thomas Herzog, 2001 (Fonte: Studio Herzog).



*Fig. 3-14: Viste del Complesso Social Housing ad Hannover, progetto Willen Associates Architekten, 2000 (Fonte: foto dell'autore).*



*Fig. 3-15: Pianta del Complesso Social Housing ad Hannover, progetto Willen Associates Architekten, 2000 (Fonte: Willen Associates Architekten).*

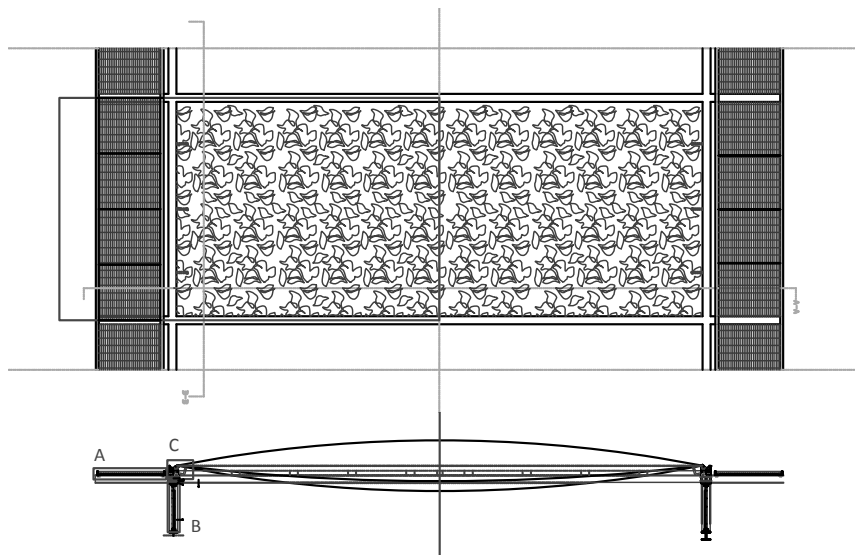


Fig. 3-16: Disegni di dettaglio nel calcolo degli impatti ambientali del Complesso Social Housing ad Hannover (Fonte: Ponzoni, 2008).

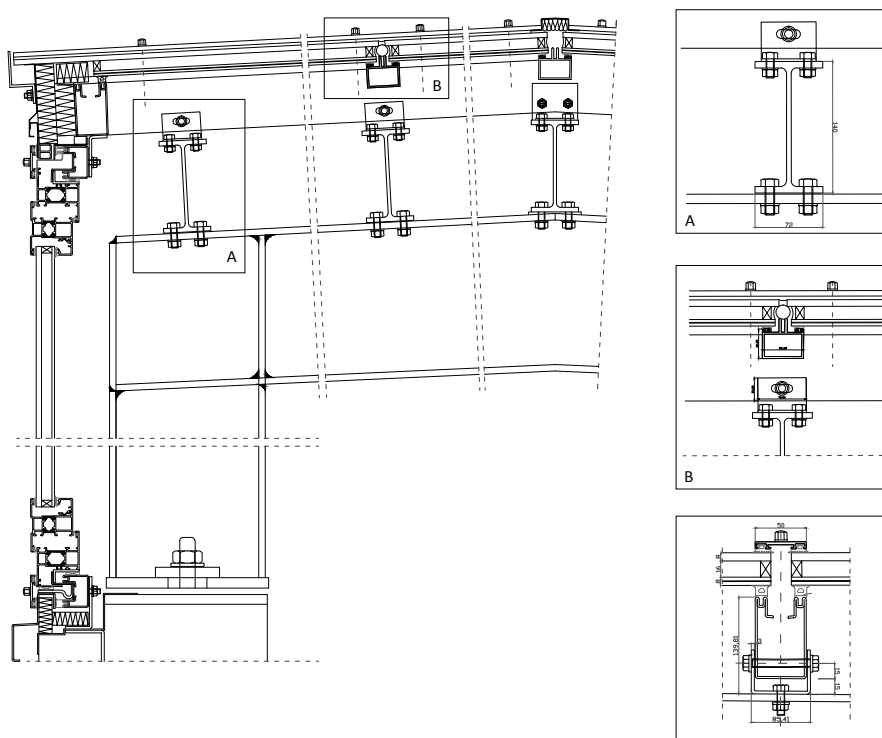


Fig. 3-17: Disegni di dettaglio degli elementi oggetto del computo nel calcolo degli impatti ambientali del Complesso Holzstrasse Building Complex a Linz (Fonte: Ponzoni, 2008).

### **3.6.1. Risultati della comparazione LCA della fase di produzione, dalla culla al cancello**

Come emerge dai grafici dell'analisi LCA, nel caso della copertura in etfe, per gli indicatori ambientali di tipo globale, il potenziale di riscaldamento globale e dell'assottigliamento dello strato di ozono, gli impatti sono nuovamente elevati, come riscontrato nella precedente analisi alla scala del materiale semilavorato, ed imputabili alle emissioni e al contenuto energetico causati dall'industria chimica nel processo di polimerizzazione dei monomeri. Relativamente alle altre categorie di impatto, la fabbricazione della struttura primaria in acciaio provoca impatti maggiormente elevati rispetto agli altri elementi del sistema, a causa del loro peso maggiore. In merito a questo tipo di sistema di involucro e in conseguenza ai risultati ottenuti, ci si deve rifare nuovamente alla responsabilità dell'industria chimica dei fluoropolimeri e al suo obiettivo per migliorare l'impatto ambientale della fase di produzione dei materiali fluoropolimerici, i cui monomeri derivano dal processo di cracking del petrolio, con conseguente dispendio di energia e emissione di gas dannosi. Nella copertura a lastre di vetro il contributo agli impatti ambientali è imputabile alla produzione delle lastre di vetro che genera danni influenti per gli effetti di acidificazione e eutrofizzazione di aria, acqua e suolo. Questo componente mostra anche la maggiore quantità di energia incorporata rispetto agli altri elementi del sistema. Riguardo all'indicatore di assottigliamento dello strato di ozono il danno ambientale maggiore è imputabile al telaio dei serramenti in alluminio.

Analizzando il contributo dei singoli componenti di entrambe le tipologie, emerge come le travi in acciaio della copertura di Hannover ( $1H = 21,50 \text{ kg/m}^2$  di superficie coperta) siano di poco più leggere della struttura in acciaio della copertura vetrata a Linz ( $1L$  e  $2L = 25,57 \text{ kg/m}^2$  di superficie coperta), di conseguenza gli impatti hanno lo stesso andamento rispetto ai diversi indicatori, come riscontrabile nei grafici seguenti. Nella copertura del complesso Holzstrasse, come quasi in tutti i sistemi vetrati, la struttura ha un'orditura primaria e una secondaria di travi in acciaio, per assicurare stabilità e resistenza meccanica al peso delle lastre; nel complesso Social Housing c'è solo la struttura primaria, grazie alla leggerezza del rivestimento in etfe. In questo modo la struttura in acciaio della copertura in etfe è più leggera di quella di Linz, per cui le quantità di materiale impiegato sono inferiori e gli impatti ambientali si riducono. Un'altra differenza tra le due tipologie di copertura è riscontrabile nel rapporto tra la superficie coperta da ogni modulo trasparente, sia esso in vetro, sia esso in etfe, e il perimetro del telaio del modulo: per il sistema in etfe il rapporto è circa 0,8 e per quello in vetro è circa 2, ovvero nel primo caso un cuscino in etfe consente di coprire una superficie maggiore rispetto a un singolo modulo vetrato, di conseguenza per coprire la stessa superficie di un cuscino in etfe il sistema vetrato necessita di più telai e più lastre.

Complessivamente i valori di impatto ambientale (per tutti gli indicatori di impatto previsti dal metodo di valutazione EPD) della copertura trasparente di Linz, con struttura primaria, secondaria, telaio in alluminio e lastre doppie di vetrocamera basso-emissiva, sono maggiori rispetto al sistema a cuscini di Hannover, composto da struttura in acciaio, telaio in alluminio per il rivestimento e cuscini in etfe. La leggerezza del film in etfe rappresenta il reale vantaggio del sistema pneumatico rispetto al sistema di copertura in vetro: un manto di copertura leggero implica meno materiali strutturali coinvolti, minor energia incorporata e minor impatto ambientale imputabile sia alla fase di produzione sia alla fase di trasporto, calcolata in peso (tonnellate) per chilometro percorso. Va tuttavia sottolineato come, in fase di scelta della tipologia costruttiva, la tecnologia pneumatica del film in etfe non in tutti i casi rappresenta complessivamente un sostituto di una copertura in vetro: l'etfe offre effettive

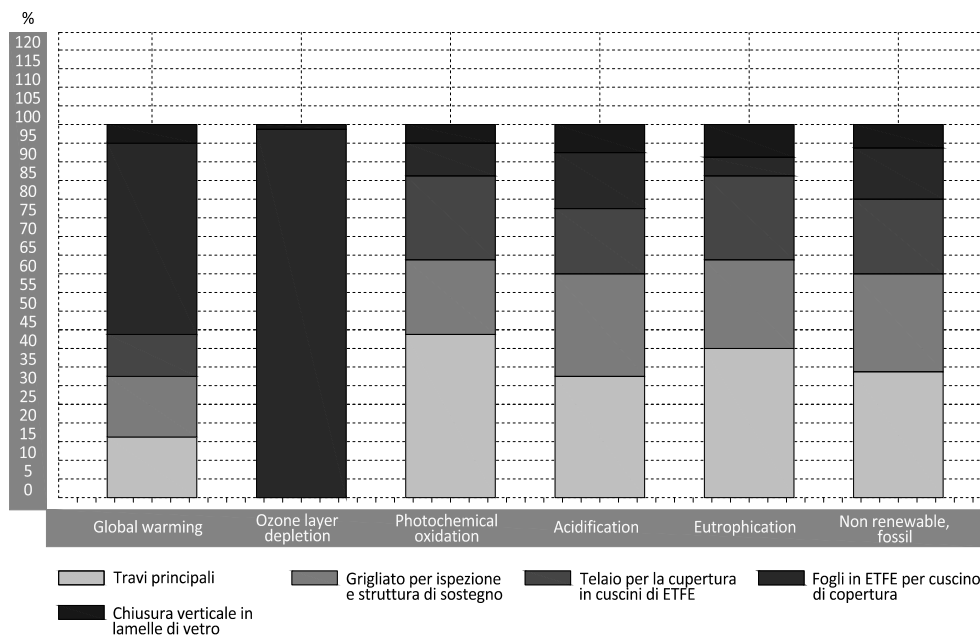


Fig. 3-18: Impatti ambientali dell'analisi LCA del sistema di copertura a cuscini pneumatici in etfe del complesso edilizio di Hannover.

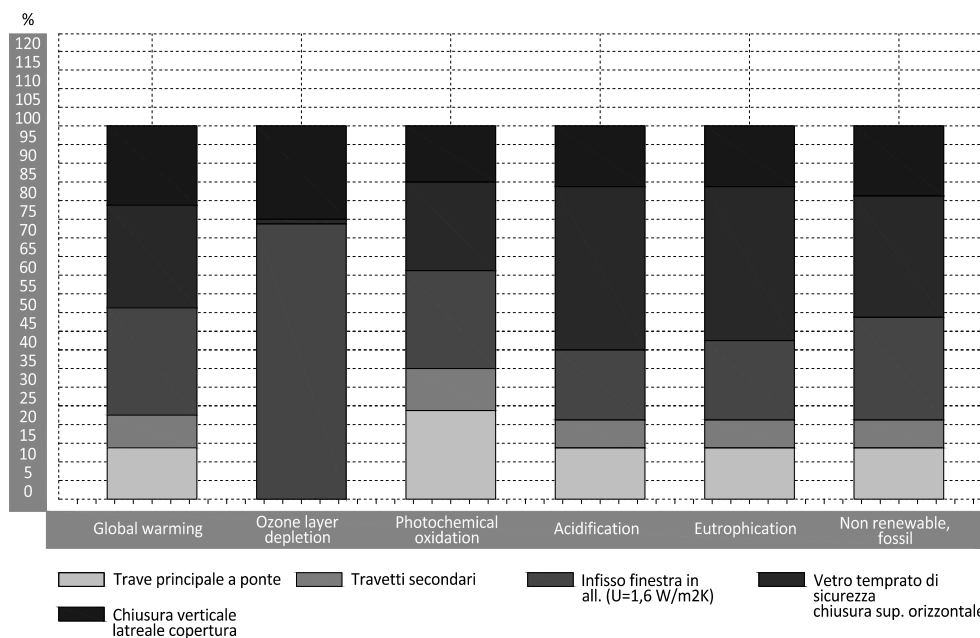


Fig. 3-19: Impatti ambientali dell'analisi LCA del sistema di copertura a lastre di vetrocamera del complesso residenziale di Linz.

interessanti alternative nei casi, in cui l'uso del vetro è limitato per dimensioni delle lastre, per peso e per costi, soprattutto nei casi di intervento progettuale su edifici esistenti ove non è contemplabile un eccessivo sovraccarico strutturale.

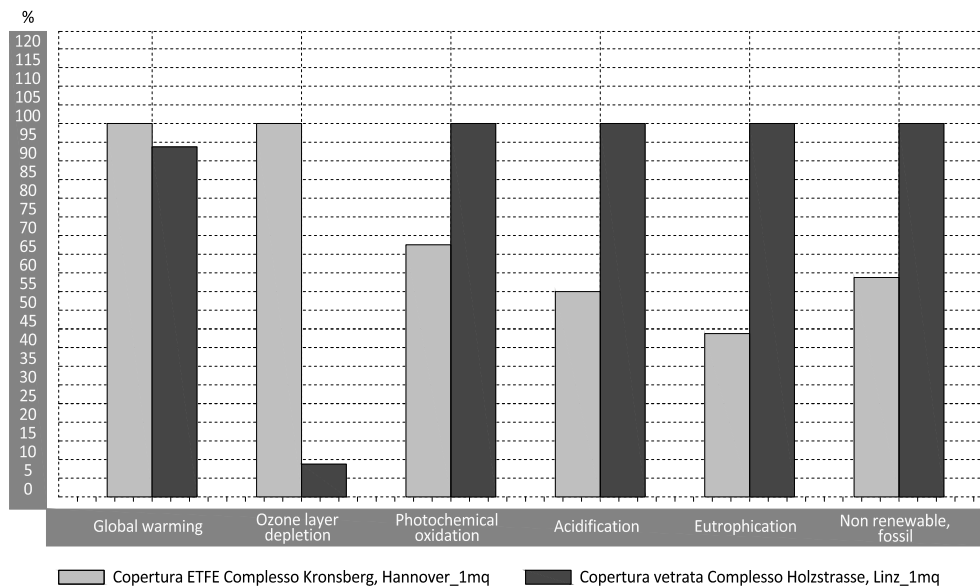


Fig. 3-20: Confronto tra i risultati degli impatti ambientali dei due edifici

Categoria d'impatto	Unità	TOT. LINZ	1L	2L	3L	4L	5L	TOT. HANNOVER	1H	2H	3H	4H	5H
Riscaldamento globale (GWP100)	kg CO2 eq	121.44	16.93	8.64	36.63	33.77	25.47	129.96	21.50	20.96	13.82	67.57	6.11
Potenziale di assottigliamento strato di Ozono (ODP)	g CFC-11 eq	0.2448	0.0003	0.0002	0.0002	0.0045	0.0621	2.7131	0.0004	0.0057	0.0005	2.7060	0.0005
Ossidazione fotochimica	kg C2H4	98.82	23.01	11.74	26.32	22.40	15.34	66.49	29.21	13.72	14.94	5.83	2.79
Acidificazione	kg SO2 eq	0.95	0.13	0.07	0.18	0.42	0.16	0.53	0.17	0.15	0.09	0.08	0.04
Eutrofizzazione	kg PO4--- eq	0.082	0.011	0.006	0.017	0.034	0.013	0.036	0.014	0.009	0.008	0.002	0.003
Energia incorporata	MJ eq	2239.27	336.99	171.93	572.88	738.01	419.46	1303.53	427.84	362.52	253.97	168.59	90.61

Tab. 3-4: Risultati della analisi LCA comparativa tra il sistema vetrato di Linz e il sistema pneumatico di Hannover.

### 3.7. Interpretazione dei risultati

Gli ultimi aspetti da approfondire, corrispondenti all'ultima fase di analisi di sensibilità dei risultati della ricerca, riguardano l'ipotesi di progettazione della struttura di copertura in vetro trasparente del Complesso Holzstrasse di Linz, ripensandola con la tecnologia pneumatica in etfe, come il tetto di Hannover, al fine di comprendere quanto materiale strutturale in acciaio si sarebbe potuto risparmiare nella costruzione. Dopo la progettazione e il calcolo strutturale di una copertura pneumatica adeguatamente dimensionata per la campata del complesso residenziale di Linz, i risultati hanno fatto emergere come la nuova ipotesi di copertura più leggera, avrebbe realmente consentito il risparmio del 12% in peso di acciaio per ciascun modulo di copertura trasparente, con l'evidente conseguente riduzione degli impatti ambientali imputabili alla produzione del materiale.



Nel caso analizzato il confronto ambientale ha inteso confrontare le due soluzioni tecniche senza voler ottenere la soluzione ambientalmente più performante in senso assoluto, ma piuttosto comprendere come ogni sistema abbia delle potenzialità e dei limiti, da considerarsi caso per caso, rispetto al contesto di progetto. In primo luogo lo studio è una applicazione sperimentale della metodologia LCA con stima approssimativa del processo di produzione dell'etfe ed è presumibile che i risultati di questa analisi LCA possano anche penalizzare il suo reale eco-profilo (non avendo preso in considerazione il miglioramento effettivamente in atto da parte delle industrie chimiche, che hanno provveduto alla chiusura del ciclo delle emissioni di gas pericolosi durante la produzione), di conseguenza è importante considerare i risultati singoli comparando ogni singola categoria di impatto ambientale.

Concludendo, gli impatti ambientali generati dalla produzione del film etfe, in particolare i risultati di energia incorporata, di potenziale di riscaldamento globale e di riduzione dell'ozono rappresentano un caso di studio dell'analisi LCA rispetto allo stato dell'arte dei dati raccolti in letteratura: rimane aperto lo scenario di affinamento dei dati primari del processo di produzione dell'etfe di derivazione dal settore industriale e di approfondimento del metodo di ponderazione degli impatti ambientali.

Pertanto questo caso di studio ha inteso esemplificare come sia possibile tramite una analisi LCA definire le potenzialità ed i limiti di soluzioni tecnologiche messe a confronto, con un approccio globale sul contributo degli impatti nel ciclo di vita.

Con l'approccio *life cycle* scenari futuri di ricerca sulla valutazione d'impatto ambientale del ciclo di vita del film fluoro polimero, in comparazione degli altri materiali, dovranno prendere in considerazione anche il contributo del riciclaggio dei materiali al risparmio energetico e al consumo di materie prime complessivi rispetto all'enorme impatto del primo ciclo di vita. L'effetto vantaggioso del riciclo, considerato un impatto evitato con segno negativo (rispetto agli impatti convenzionalmente di segno positivo), può essere espresso dal contributo del processo di lavorazione del materiale secondario di riciclo a cui viene sottratto il contributo imputabile alla fabbricazione di nuovo materiale vergine.

## **CICLO DI VITA DELL'EDIFICIO E CONTENIMENTO DEI CONSUMI ENERGETICI\***

Con un approccio progettuale volto a considerare la circolarità di flussi di energia nel ciclo di vita dell'edificio, nel caso in cui si debba progettare la forma dell'edificio in equilibrio con il contesto ambientale di riferimento e abbinare soluzioni tecnico-costruttive finalizzate a migliorare l'isolamento termico e, quindi, a ridurre i consumi energetici dell'edificio, è sempre più indispensabile svolgere una valutazione LCA, che abbia come finalità un bilancio energetico complessivo volto all'ottimizzazione dei consumi in tutte le fasi della vita dell'edificio. Negli ultimi anni le normative internazionali e nazionali, le iniziative di incentivo da parte delle Pubbliche Amministrazioni, gli obblighi di certificazione energetica e alcuni strumenti di mercato hanno indotto i progettisti ad operare grande attenzione all'orientamento, alla forma dell'edificio e alla scelta dei materiali e prodotti per un involucro edilizio ben isolato e per un manufatto a ridotto consumo energetico. A queste strategie progettuali si integrano impianti di climatizzazione ad alto rendimento ed alta efficienza e altri che fanno uso di energie rinnovabili, al fine di convergere nell'autosufficienza energetica e nell'annullamento delle emissioni di gas serra. Tuttavia tale approccio contempla solo la fase d'uso dell'edificio, con i soli consumi per la gestione, ma risulta sempre più necessaria la verifica del bilancio energetico lungo tutte le fasi del ciclo di vita di un manufatto architettonico. È infatti necessario valutare il consumo di energia per costruire l'edificio e quello per la manutenzione delle sue parti nella fase d'uso. Prendendo atto della prassi ormai sempre più corrente di costruire involucri molto performanti, gli spessori delle stratificazioni murarie e del materiale isolante aumentano, con i conseguenti incrementi di peso e quantità di materiale impiegato nell'edificio e, quindi, incremento del materiale da produrre. In altre parole la riduzione dei consumi energetici in fase d'uso, grazie a involucri performanti, corrisponde ad un aumento dei consumi energetici nella fase pre-consumo. È indispensabile di conseguenza la verifica del bilancio energetico sull'arco di vita dell'edificio, che va dal consumo energetico per la produzione di materiali e componenti al consumo in fase d'uso e di manutenzione delle soluzioni tecniche messe in opera.

### **4.1. Scenari di forma e durata per l'individuazione di soluzioni tecniche ottimali alla specificità dei progetti**

In questa prospettiva del ciclo di vita, volto al bilancio energetico totale, va aggiunto il ruolo della durata degli edifici e delle singole parti d'opera, aspetto quanto mai critico. Si

*\*Tutti i grafici esiti delle valutazioni LCA sono elaborazione dell'autore e frutto del minuzioso supporto grafico e di layout di Lucia Ticozzi*

registrano situazioni in cui medesimi materiali e sistemi costruttivi vengono utilizzati nelle costruzioni (residenziali e non) in modo indifferenziato per usi di media e lunga durata o con sostituzioni brevi, senza una progettazione programmata per la durata fisica e prestazionale assicurata. La scelta di materiali e componenti e dei sistemi di messa in opera va valutata in relazione alla loro durata garantita e alla vita utile prevista degli edifici; gli aspetti legati al tempo vanno presi in considerazione fin dalla prima fase del processo progettuale, poiché la scelta influenza direttamente gli impatti ambientali della costruzioni nel medio e lungo periodo, via via maggiori se i sistemi edilizi necessitano di molti cicli di manutenzione, con un conseguente aumento di energia incorporata nell'edificio per tutta la sua vita. Infatti la presenza di elementi con cicli di manutenzione brevi rispetto alla durata prevista dell'edificio, significa manutenzione e sostituzione con nuovi materiali, quindi nuovi consumi di energia per la loro produzione e messa in opera.

La seguente applicazione LCA vuole essere di chiarimento e esemplificativa; ha l'obiettivo di svolgere una valutazione energetica complessiva del ciclo di vita di due differenti tipologie edilizie ed è uno dei primi studi che mette a sistema e misura, secondo la procedura LCA, il tempo e le durate nel computo del consumo energetico nella fase d'uso dell'edificio, prendendo in considerazione il possibile decadimento prestazionale dei materiali costituenti l'involucro degli edifici. Il caso studio si rivolge in particolare ai progettisti come possibile ausilio al processo decisionale nel ciclo del progetto. L'applicazione di una valutazione LCA è lo strumento appropriato per quantificare e confrontare i consumi di energia nel ciclo di vita dell'edificio in relazione a differenti soluzioni tecniche d'involucro, al fine di orientare il progettista a quella più efficace in relazione al contesto, al tipo, a forma e funzione dell'edificio, alla vita utile stimata. Lo studio introduce la cadenza dei cicli di sostituzione di materiali e componenti per le chiusure verticali esterne in relazione alla loro durata stimata nella vita utile degli edifici, al fine di comprendere la centralità delle scelte tecnologiche e materiali all'interno del processo progettuale, e la loro ricaduta in termini di consumi energetici sul ciclo di vita dell'edificio. Due differenti tipologie edilizie, una casa unifamiliare monopiano e una torre di 16 piani, e sei tipi di chiusure verticali esterne, di cui cinque soluzioni tecniche in laterizio tipiche del panorama costruttivo italiano e una soluzione leggera assemblata a secco, sono stati scelti come casi di studio. Per ognuno sono state calcolate e comparate l'energia incorporata pre-consumo, il fabbisogno energetico primario e l'energia incorporata per la manutenzione su un ciclo di vita d'uso di 60 anni. La durata prevista dei prodotti edilizi e il decadimento prestazionale di componenti e subsistemi dell'edificio sono stati scelti come parametri per il confronto fra due tipologie edilizie e fra diverse soluzioni tecniche d'involucro. Lo studio è finalizzato anche all'analisi dell'incidenza sui risultati del bilancio energetico nel ciclo di vita dell'edificio della scelta di soluzioni tecniche alternative di involucro, per due differenti tipologie edilizie: un confronto fra le fasi di vita dell'edificio quindi fra energia incorporata, energia per la gestione e energia per la manutenzione in relazione al tempo.

Rispetto agli indicatori di impatto ambientale, in tal caso ci si è limitati alla valutazione dell'indicatore sintetico "Consumo di Energia": a. "Energia incorporata" (*Embodied Energy - EE*) (MJ/kg) per computare l'energia spesa nella fase di costruzione, ovvero quella quantità di energia non rinnovabile usata per la produzione di una unità di componenti o materiali impiegati e dell'edificio (estrazione dei materiali, trasporto dall'origine al sito produttivo, processi di lavorazione, imballaggio, stoccaggio, trasporto al cantiere e messa in opera); b. "Energia non rinnovabile" consumata per la climatizzazione dell'edificio nella fase d'uso

(sono trascurati i consumi energetici per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'energia elettrica).

Con riferimento alla sequenza delle fasi della procedura di valutazione LCA, approfondita nel capitolo 2, tale studio ha contemplato le fasi di: a. Definizione degli scopi, dei confini del sistema e dell'unità funzionale, b. Analisi di inventario dell'energia consumata nei processi produttivi e computo dell'energia consumata per la climatizzazione, c. Analisi degli impatti tramite la classificazione e la caratterizzazione dei consumi di energia.

Lo studio ha indagato le seguenti fasi del ciclo di vita: pre-produzione (acquisizione delle risorse, trasformazione delle risorse in materiali ed energia), produzione fuori opera (lavorazione delle materie prime in semilavorati, produzione di componenti edilizi, assemblaggio di componenti e subcomponenti), messa in opera, uso e manutenzione (con sostituzione di materiali e componenti). I contributi delle fasi di trasporto dall'azienda manifatturiera al cantiere, di cantiere e di fine vita sono stati omessi.

In mancanza di una banca dati LCI di materiali per l'edilizia italiana, si è consultata la banca dati per i processi di produzione dei materiali è *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, anglosassone elaborata dai proff. G. Hammond & C. Jones dell'Università di Bath, del *Sustainable Energy Research Team (SERT), Dept. of mechanical Engineering*.

#### **4.2. Obiettivo dell'applicazione dell'analisi energetica LCA**

La necessaria convergenza fra sostenibilità, previsione di vita utile e durabilità è tema di grande dibattito sul panorama scientifico internazionale, sia sul fronte della ricerca riguardo la durabilità di materiali e componenti, sia su quello della valutazione del ciclo di vita nel settore delle costruzioni.

L'obiettivo dello studio è stato quello di mettere a punto e verificare una procedura che contempli durabilità dei materiali e vita utile degli edifici nella analisi LCA. L'applicazione di tale approccio metodologico serve a confrontare la relazione fra gli impatti ambientali generati dai cicli di manutenzione e quelli per la costruzione e gestione dell'edificio e a comprendere come la scelta di soluzioni tecniche d'involucro differenti incida sui risultati di una valutazione ambientale lungo tutto il ciclo di vita dell'edificio. L'applicazione ad alcuni casi studio è focalizzata sulle prestazioni termiche dell'involucro quale subsistema direttamente imputato nel comfort termico abitativo. Quindi nello studio seguente sono stati trascurati quei subsistemi dell'edificio che non investono direttamente alcun ruolo termico nella vita degli edifici. È stata messa a punto una procedura, facilmente ripetibile per altri studi simili. Come sopra anticipato, si è usato un approccio semplificato al metodo LCA considerando la sola prestazione energetica "Consumo di Energia", che facilita la comprensione dei consumi in fase di costruzione e in fase d'uso.

#### **4.3. Dati di riferimento sulla vita utile degli edifici e dei loro componenti**

L'approccio del gruppo di ricerca sull'applicazione del metodo LCA all'edificio ha lo scopo di evidenziare come nel progetto della vita di un edificio sia necessario conoscere gli anni di vita utile, per poter di conseguenza compiere scelte tecnico-costruttive e materiche, considerando la durabilità tra le prestazioni richieste. Nella specificità dell'LCA la dimensione temporale è importante per poter quantificare il consumo di energia per la climatizzazione e la manutenzione nella fase di gestione dell'edificio.

Dall'approfondimento sugli studi di stima della vita utile degli edifici residenziali è emersa la difficoltà di disporre di riferimenti precisi. Alcuni studi hanno individuato diverse durate di vita degli edifici e stimato l'età media in correlazione alla frequenza dei cicli di ricostruzione (Kornmann, M., *'Rapport de recherche - Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie - Étude bibliographique des avis d'expert'* (CTMNC, Parigi, 2008)). Altri studi svolti hanno messo in luce come, in correlazione con il contesto del progetto, le durate di vita delle costruzioni siano molto variabili e conseguenza di alcuni parametri: sviluppo e distribuzione della popolazione, storia e tradizioni, tradizioni costruttive (quindi legate alla durabilità dei materiali e dei componenti), andamento del mercato immobiliare delle singole realtà, economia e clima. Dalla letteratura sono rintracciabili valori di riferimento di durate di vita reali (pari al doppio degli anni di vita media) utili nell'analisi LCA: generalmente sono superiori a 60 anni, ad eccezione degli USA. Nei paesi in cui gli anni di vita media e le durate di vita reali sono elevate (in Europa centro-meridionale superiori a 100 anni), le tecnologie costruttive sono di tipo tradizionale in muratura, con durata prolungata. Nei paesi nord-europei, con l'uso di tecnologie leggere in legno, le durate di vita media sono generalmente brevi e più soggette a variazioni (tra 36 e 90 anni). I materiali e componenti edilizi difficilmente hanno lo stesso comportamento nel tempo o la stessa durata dell'edificio. È quindi fondamentale avere informazioni sulla loro durabilità e vita di servizio per valutare nell'LCA gli impatti generati dai cicli di manutenzione. A livello normativo vi sono prescrizioni riguardo all'obbligo di assicurare durate ai componenti degli edifici (soglie minime) e a livello applicativo vi sono banche dati che riportano le durate tipiche di componenti edilizi, basate sulla media di anni riscontrati nella prassi. Nella ricerca condotta, riferendosi alle informazioni acquisite, si è assunto uno scenario di vita utile dell'edificio, in un contesto italiano, di 60 anni per l'analisi LCA e, alla scala dei materiali e componenti edilizi, si è cercato di fare chiarezza sulle possibili fonti di informazione delle durate tipiche e sul tipo di informazione da adottare. Si è costruito un quadro comparativo delle durate di vita dei materiali e componenti edilizi coinvolti nel caso di studio, consultando le voci corrispondenti presenti nelle seguenti banche dati: HAPM (Housing Association Property Mutual), *Component Life Manual* (4° edition), E & F.N. Spon, London, 1996; Dall'Isola A.J., Kirk S.J., *Life cycle cost data*, McGraw-Hill, New York, 1982-83 (aggiornata al 1995); ASTM (American Society for Testing and Materials), *Building Maintenance, Repair and Replacement Database for Life Cycle Cost Analysis* (1985 and aggiornata al 1995); INIES - *Base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction*, <http://www.inies.fr>; HEV - Associazione Svizzera Inquilini (MV) e dall'Associazione dei Proprietari Immobiliari, *Tabella della durata di vita*, (SMV, Massagno, Svizzera, 2005); BRE, *Green Guide* (BRE, London, 2009), basata sul *BLP Construction Durability Database*; BOMA (Building Owners and Manager Association) *Preventive maintenance guide*, (BOMA International, New York, 1992); indicazioni riportate nel testo di K. Adalberth "Energy use during the Life Cycle of Buildings: a Method" (in *Building and Environment*, 32(4) (1997) 317-20).

Ogni database ha una propria logica nel riportare la durata di vita, riferita in alcuni casi a singoli componenti, in altri a subsistemi: Green Guide, così come Dell'Isola, esprime la durata per tipo di involucro o subsistema dell'edificio, raggruppando in un unico numero di anni la durata della soluzione tecnica, come se tutti gli strati costituenti la parete avessero una stessa vita utile; INIES, insieme alle restanti, dà informazioni di durata di vita del singolo prodotto.

Per l'analisi LCA è funzionale disporre del dato di durata per singolo materiale o componente. Emerge incertezza quando per un materiale specifico corrispondono valori di durata di vita divergenti, provenienti da database diversi. Per esempio, riferendosi ai database sopra citati, la durabilità dell'intonaco interno è di 15 anni in due fonti e di 35 in un altro caso; se confrontata con quella dell'intonaco esterno (maggiormente esposto a agenti di degrado rispetto all'intonaco interno), indicata pari a 40 o 50 anni, è difficile comprendere la logica delle informazioni raccolte da utilizzare con certezza nell'LCA.

#### **4.4. I casi di studio**

Gli oggetti dell'analisi energetica LCA sono, alla scala di analisi dell'edificio, due tipologie edilizie, una casa singola unifamiliare e un edificio pluripiano a torre; e, alla scala del sub sistema delle chiusure verticali, sei tipi di involucro. Complessivamente due tipologie edilizie a cui si applicano sei soluzioni d'involucro differenti generano i dodici casi di studio.

##### **4.4.1 Edifici di riferimento: villa unifamiliare e torre multipiano**

Sono state definite due tipologie edilizie, volutamente molto differenti rispetto ai modelli edilizi residenziali, caratterizzate da due diversi rapporti Superficie lorda di involucro disperdente sul Volume lordo costruito condizionato ( $S/V$ ). Purché semplificate nella forma, rappresentano modelli diffusi nel parco edilizio esistente in Italia:

- a. edificio unifamiliare indipendente (4 affacci), un piano fuori terra ( $S/V=0,90$ ;  $Slp = 150 \text{ m}^2$ );
- b. edificio a torre pluripiano indipendente (4 affacci), sedici piani fuori terra ( $S/V=0,375$ ;  $S_{\text{coperta}} = 529 \text{ m}^2$ ;  $Slp = 7888 \text{ m}^2$ );

La destinazione d'uso dei due edifici è residenziale. La distribuzione delle parti finestrate è coerente con le prescrizioni del regolamento edilizio (rapporto involucro trasparente/superficie dell'ambiente su cui insistono  $\geq 1/8$ ) e in entrambi i casi le finestre sono distribuite allo stesso modo sui quattro affacci.

Entrambi gli edifici hanno lo stesso tipo di solaio controterra, copertura, finestre, impianti di riscaldamento e raffreddamento. Nella valutazione dell'energia incorporata negli edifici sono stati omessi nell'inventario i subsistemi delle strutture, delle partizioni interne e, per la torre, di 16 solai di interpiano: questi genererebbero sicuramente una grande differenza di valori di energia incorporata tra i casi unifamiliari e i casi a torre, ma non influenzano gli esiti del confronto fra le sei tipologie d'involucro, su cui si focalizza tale studio.

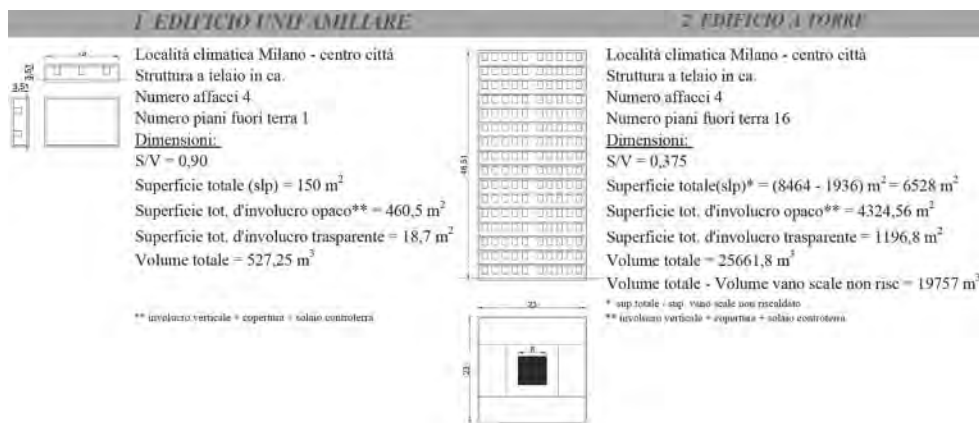


Fig. 4-1 Le due tipologie edilizie: la casa unifamiliare monopiano e l'edificio a torre pluripiano.

1 EDIFICIO UNIFAMILIARE	2 EDIFICIO A TORRE
Località climatica Milano - centro città Struttura a telaio in ca. Numero affacci 4 Numero piani fuori terra 1 <u>Dimensioni:</u> S/V = 0,90 Superficie totale (slp) = 150 m <sup>2</sup> Superficie tot. d'involucro opaco** = 460,5 m <sup>2</sup> Superficie tot. d'involucro trasparente = 18,7 m <sup>2</sup> Volume totale = 527,25 m <sup>3</sup>	Località climatica Milano - centro città Struttura a telaio in ca. Numero affacci 4 Numero piani fuori terra 16 <u>Dimensioni:</u> S/V = 0,375 Superficie totale(slp)* = (8464 - 1936) m <sup>2</sup> = 6528 m <sup>2</sup> Superficie tot. d'involucro opaco** = 4324,56 m <sup>2</sup> Superficie tot. d'involucro trasparente = 1196,8 m <sup>2</sup> Volume totale = 25661,8 m <sup>3</sup> Volume totale - Volume vano scale non risc = 19757 m <sup>3</sup>
** involucro verticale + copertura + solaio controterra	* sup. totale - sup. vano scale non riscaldato ** involucro verticale + copertura + solaio controterra
<u>Trasmissioni termiche dei subsistemi d'involucro</u> U <sub>involucro opaco</sub> = 0,33 W/m <sup>2</sup> K U <sub>serramento</sub> = 2,4 W/m <sup>2</sup> K U <sub>copertura</sub> = 0,30 W/m <sup>2</sup> K U <sub>controterra</sub> = 0,29 W/m <sup>2</sup> K	<u>Trasmissioni termiche dei subsistemi d'involucro</u> U <sub>involucro opaco</sub> = 0,33 W/m <sup>2</sup> K U <sub>serramento</sub> = 2,4 W/m <sup>2</sup> K U <sub>copertura</sub> = 0,30 W/m <sup>2</sup> K U <sub>controterra</sub> = 0,29 W/m <sup>2</sup> K U <sub>parete interna verso vano scale</sub> = 0,33 W/m <sup>2</sup> K
Sup. disperdente involucro opaco verso nord = 48,84 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso sud = 48,84 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso est = 31,41 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso ovest = 31,41 m <sup>2</sup>  Sup. disperdente involucro trasparen verso nord = 5,60 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso sud = 5,60 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso est = 3,7 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso ovest = 3,7 m <sup>2</sup>  Sup. disperdente in copertura = 150 m <sup>2</sup> Sup. disperdente contro terra = 150 m <sup>2</sup>	Sup. disperdente involucro opaco verso nord = 816,64 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso sud = 816,64 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso est = 816,64 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro opaco verso ovest = 816,64 m <sup>2</sup>  Sup. disp. involucro opaco verso vano scale = 2112 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso nord = 299,2 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso sud = 299,2 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso est = 299,2 m <sup>2</sup> Sup. disperdente involucro trasparen verso ovest = 299,2 m <sup>2</sup>  Sup. disperdente in copertura = 529 m <sup>2</sup> Sup. disperdente contro terra = 529 m <sup>2</sup>

Fig. 4-2 - Localizzazione degli edifici, dati dimensionali per le tipologie edilizie, caratteristiche termiche dei sub sistemi d'involucro, dimensioni delle superfici disperdenti.

Gli edifici presentano alcune soluzioni tecniche comuni per i subsistemi, al fine di agevolare la comparazione energetica. Come già anticipato la variabile indipendente è la soluzione per la chiusura verticale perimetrale opaca, descritta nel paragrafo successivo.

Il solaio contro terra è composto in laterocemento isolato su strato di ghiaia:

Solaio controterra isolato		Specifiche strati					Specifiche solaio						
N° strato	descrizione strato	sp.	$\rho$	$\lambda$	c	R	sp.	$R_{tot}$	$U_{tot}$	Ms	$\Delta t$	f	$Y_E$
	Unità di misura	[m]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/KgK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[m]	[m <sup>2</sup> K/W]	[W/m <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[h]	[-]	[W/m <sup>2</sup> K]
I	1/hi					0.17							
strato 1	pavimento ceramico**	0.015	2300	1.000	-	0.015							
strato 2	massetto** cls. con argilla espansa	0.06	800	0.4	-	0.15							
strato 3	isolante - natura minerale	0.08	155	0.036	1030	2.33							
strato 4	guaina impermeabilizzante**	0.01	1300	0.260	910	0.04							
strato 5	solaio laterocemento**	0.26	1150	0.743	880	0.35							
strato 6	strato di ghiaia	0.4	1700	1.200	750	0.33							
E	1/he					0.04							

\*\* valori termici da norma UNI 10355

Tab. 4-1: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio contro terra

Il solaio di copertura è di tipo piano non calpestabile, ispezionabile e composto in laterocemento isolato con strato di finitura in ghiaia:

Solaio di copertura in laterocemento iso.		Specifiche strati					Specifiche solaio						
N° strato	descrizione strato	sp.	$\rho$	$\lambda$	c	R	sp.	$R_{tot}$	$U_{tot}$	Ms	$\Delta t$	f	$Y_E$
	Unità di misura	[m]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/KgK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[m]	[m <sup>2</sup> K/W]	[W/m <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[h]	[-]	[W/m <sup>2</sup> K]
I	1/hi					0.10							
strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0.015	1150	0.700	1010	0.02							
strato 2	solaio laterocemento**	0.18	1150	0.600	880	0.30							
strato 3	isolante - natura minerale	0.10	155	0.036	1030	2.78							
strato 4	guaina bituminosa**	0.01	1300	0.260	910	0.04							
strato 5	strato di ghiaia	0.08	1700	1.200	750	0.07							
E	1/he					0.04							

\*\* valori termici da norma UNI 10355

Tab. 4-2: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio di copertura

I solai interpiano per l'edificio a torre sono costituiti da una soluzione tradizionale in laterocemento (sp. = 30cm, U = 0,49 W/m<sup>2</sup>K), intonacato a calce e gesso nell'intradosso, isolato e pavimentato con elementi ceramici su un massetto in calcestruzzo alleggerito con argilla.

Solaio interpiano in laterocemento		Specifiche strati					Specifiche solaio						
N° strato	descrizione strato	sp.	$\rho$	$\lambda$	c	R	sp.	$R_{tot}$	$U_{tot}$	Ms	$\Delta t$	f	$Y_E$
	Unità di misura	[m]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/KgK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[m]	[m <sup>2</sup> K/W]	[W/m <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[h]	[-]	[W/m <sup>2</sup> K]
I	1/hi					0.1							
strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0.015	1150	0.700	1010	0.021							
strato 2	solaio laterocemento**	0.18	1300	0.6	880	0.3							
strato 3	isolante - natura minerale	0.05	155	0.036	1030	1.39							
strato 4	Massetto compl. con argilla espansa	0.04	800	0.400	880	0.10							
strato 5	Rivestimento in piastrelle	0.02	2300	1.000	800	0.02							
E	1/he					0.10							

\*\* valori termici da norma UNI 10355

Tab. 4-3: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti il solaio interpiano.

Le chiusure verticali trasparenti sono costituite da serramenti con telaio in alluminio e legno e vetrocamera con vetri basso emissivi, selettivi pirolitici ( $g = 0,63$ ), con distanziatore metallico ( $\psi = 0,08$ ). Il telaio è previsto in legno ( $U_{frame} = 1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), con doppio vetro 4-16-4 con trattamento basso emissivo ( $U_{glass} = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).



#### 4.4.2. Tipologie di involucro di riferimento

Alle due tipologie edilizie sono state associate sei diverse soluzioni di involucro, progettate per avere la stessa trasmittanza termica (valore  $U=0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Le soluzioni tecniche illustrate nel seguito individuano sei tipologie di stratificazione:

- muratura monostrato intonacata con isolamento a cappotto esterno (spessore laterizio =30cm);
- a doppio strato, intonacato (lo spessore dei paramenti murari in laterizio è di 15cm, per quello verso l'interno, e di 8cm, per quello esterno);
- a doppio strato con intercapedine isolata e rivestimento esterno in mattoni faccia a vista (spessore laterizio =20cm);
- monostrato con isolante in intercapedine ventilata verso l'esterno e rivestimento con tavelle di cotto assemblate a secco (facciata ventilata) (spessore laterizio =30cm),
- monostrato intonacato (spessore laterizio =36,5cm);
- leggera a montanti metallici, assemblata a secco, con isolante, camera d'aria, rivestimento interno in pannelli di cartongesso e esterno in pannelli sandwich costituiti da due lamiere di alluminio e un nucleo in LDPE nero.

Per la costruzione delle stratificazioni si è fatto riferimento a prodotti specifici presenti sul mercato dotati di marcatura CE, per i quali fossero disponibili le informazioni relative alle caratteristiche termiche specifiche. Il materiale isolante termico utilizzato in tutte le soluzioni è la lana minerale. A parità di trasmittanza lo spessore delle soluzioni d'involucro è diverso, quindi ogni area climatizzata dei dodici casi studio è diversa, tenendo fisso il perimetro esterno.







inv. A	inv. B	inv. C	inv. D	inv. E	inv. F	
						$U = 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$
37,5	37	40	43,1	39,3	17,2	Spessore totale parete (cm)
30	15 + 8	20 + 12	30	36,5	-	Spessore laterizio (cm)
5	6	5	4	-	9	Spessore isolante (cm)
309,3	258,38	349,12	306,66	341,5	42,87	Massa superf. (kg/m <sup>2</sup> )

Fig. 4-3: Le sei soluzioni di involucro applicate alle tipologie edilizie.

Specifiche componenti		Conducibilità termica $\lambda$ [W/mK]	Calore specifico $c$ [J/KgK]	Densità $\rho$ [Kg/m3]	Spessore min. [mm]
Rivestimento interno					
Intonaco calce, gesso e perlite	Intonaco di fondo a base di calce, gesso e perlite: è una malta secca composta da gesso, calce idrata, perlite, sabbie classificate e additivi specifici per migliorare la lavorazione e l'adesione. Prodotto usato come intonaco di fondo per interni su murature di mattoni, blocchi di cls., etc.	0,7	1010	1150 (intonaco indurito)	5
Lastra di cartongesso	Costituite da uno strato di gesso di cava steso tra due fogli di cartone speciale resistente e aderente. Usato per pareti divisorie interne e controsoffitti.	0,21	837	900	25
Rivestimento esterno					
Intonaco calce e cemento bianco o grigio	Intonaco di finitura a base di calce e cemento Portland bianco o grigio, sabbie classificate e additivi specifici per migliorare la lavorabilità e l'adesione al supporto. Usato come finitura al civile su intonaci di fondo a base cementizia.	0,4	910	1300	3
Intonaco calce e cemento per esterni e interni	Intonaco di fondo a base di calce idrata e cemento Portland, sabbie classificate e additivi specifici per migliorare la lavorabilità e l'adesione. Usato come intonaco di fondo su murature in mattoni o in blocchi di cls.	0,55	910	1530	20
Rete porta-intonaco in fibra di vetro	rete leggera impiegata nelle rasature superficiali per completare con diversi materiali le soluzioni di isolamento a cappotto	/	/	2600	0,5
Pannello in alluminio	pannello costituito da due lamiere in lega di alluminio eraluman 100 AlMg1 e da un nucleo in LPDE nero	Al = 160	880	2700	3,5
		LPDE = 0,5	1800	660	
Strato di materiale isolante					
Pannello in lana minerale	pannello rigido a doppia densità. Lo strato superficiale esterno ad alta densità assicura aderenza ottimale dell'intonaco rasante. Lo strato interno a densità minore è concepito per migliorare la prestazione termica del pannello. La struttura a celle aperte garantisce la traspirabilità al prodotto. Usato per isolamenti di cappotto e in intercapedine per pareti perimetrali in laterizio.	0,036	1030	155	40 ÷ 180
Blocchi di laterizio					
Blocco in laterizio 30x25x19cm *valori riferiti al blocco	estruso a setti sottili con due fori di presa, a fori verticali, posato con i fori lunghi e stretti perpendicolari al verso dell'onda termica. Usato per pareti perimetrali portanti e non portanti.	0,193*	1000	790*	300
Blocco in laterizio 15x50x19cm a incastro *valori riferiti al blocco	estruso a setti sottili con fori verticali. Usato per pareti perimetrali non portanti, in murature a cassetta, o per muri divisorii interni.	0,250*	1000	805*	150
Blocco in laterizio 8x24x24cm *valori riferiti al blocco	estruso a setti sottili, a fori verticali. Usato per pareti perimetrali non portanti o muri divisorii interni.	0,271*	1000	670*	80
Blocco forato 20x22,5x40cm *valori riferiti al blocco	mattoni a fori verticali 60% di foratura Usato per pareti perimetrali portanti e non portanti.	0,195*	1000	690*	200
Laterizio faccia a vista 12x25x5,5cm *valori riferiti al blocco	estruso con 35% di foratura, fori verticali. Usato per rivestimenti esterni faccia a vista in paramenti murari a cassetta.	0,285*	1000	1100*	120
Blocco in laterizio 30x25x22,5cm *valori riferiti al blocco	estruso a setti sottili con due fori di presa, a fori verticali, posato a incastro con i fori lunghi e stretti perpendicolari al verso dell'onda termica. Usato per pareti perimetrali portanti e non portanti.	$R_{int} = 1,58$ $m^2K/W$	1000	900*	300
Tavelle di laterizio 4x49,5x24,5cm *valori riferiti al blocco	estruse, ottenute tramite trafilatura di argille ricche di ossido di ferro ( che ne accentua il colore rosso), messe in opera a secco grazie a agganci e supporti metallici. Usate per i rivestimenti in cotto faccia a vista assemblati a secco per facciate ventilate.	0,5*	1000	1100*	40
Blocco in laterizio 24,7x36,5x24,9cm *valori riferiti al blocco	estruso rettificato a setti molto sottili con due fori di presa, posato a incastro con i fori verticali, lunghi e stretti, perpendicolari al verso dell'onda termica. Usato per pareti perimetrali portanti e non portanti.	0,16*	1000	800*	365
Elementi aggiuntivi					
Montanti in acciaio	profili a freddo in acciaio a C. Usati come montanti per tamponamenti verticali.	-	Peso (Kg/ml) = 1,67	7800	40/100/0,6
Profilo in alluminio	profilo a U verticale in alluminio (passo 1 ml). Usato per montare sistemi di finiture in pannelli di cartongesso.	-	Vol. ( $m^3/m^2$ ) = 0,00044	2700	-
Vite d'aggancio del rivestimento	in acciaio zincato, si prevedono sei al $m^2$ . Usate per fissare i rivestimenti alla sottostruttura.	-	Vol. ( $m^3/m^2$ ) = 0,000003	7800	L 4,2 - 25 $\varnothing$ 2mm

Fig. 4-4: Componenti coinvolti nelle stratificazioni d'involucro.

#### 4.5 Approccio metodologico alla valutazione degli impatti energetici

Il valore totale di energia incorporata nella costruzione e nei cicli di manutenzione, durante la vita utile, è stato calcolato e confrontato con il fabbisogno energetico primario totale per il riscaldamento e il raffreddamento. Il metodo utilizzato per l'analisi energetica nel ciclo di vita segue le procedure conformi alla norma ISO 14040. Si è assunto uno scenario di vita utile degli edifici di 60 anni.

L'analisi energetica LCA si articola in alcuni punti, corrispondenti alla sequenza delle fasi del ciclo di vita, ovvero:

- a. Definizione delle caratteristiche dimensionali dei due edifici e delle sei tipologie di involucro;
- b. Calcolo delle prestazioni termiche delle soluzioni d'involucro, necessarie al successivo calcolo del fabbisogno energetico primario degli edifici ( $U_{\text{value}}$ );
- c. Computo dell'energia incorporata per ogni tipologia di involucro, calcolata su un  $\text{m}^2$  di superficie verticale, e si confrontano i risultati dei sei tipi, in cui emergono le quote di energia per strato di materiale costituente la parete ( $\text{EE}/\text{m}^2_{\text{parete}}$ );
- d. Calcolo dell'energia incorporata per la costruzione dell'involucro dei due edifici (chiusure verticali opache e trasparenti, solaio contro terra, solaio di copertura, solai interpiano nel caso della tipologia torre) – *IMPATTI IN FASE DI COSTRUZIONE* ( $\text{EE}_{\text{tot}}$ );
- e. Confronto dei risultati dei due edifici e le relative considerazioni;
- f. Calcolo dell'energia necessaria per contrastare le dispersioni termiche e il fabbisogno energetico primario annuo degli edifici – *IMPATTI IN FASE D'USO* ( $Q_c, Q_{\text{hv tot}}$ );
- g. Valutazione e approfondimento dei risultati per i due edifici, e considerazioni;
- h. Confronto degli impatti, quindi le energie incorporate, in fase di costruzione con il fabbisogno energetico primario nella fase di esercizio: questi confronti sono condotti separatamente per le sue tipologie di edifici, quindi la comparazione ha come variabili solo le diverse tipologie di involucro per ogni edificio ( $\text{EE}_{\text{costr}}$  vs  $Q_c, Q_{\text{hv tot}}$ );
- i. Ipotesi dello scenario di durata degli edifici per procedere con l'analisi del ciclo di vita delle chiusure verticali opache;
- j. Indagine sull'obsolescenza e sui cicli di manutenzione dei materiali e componenti coinvolti nelle stratificazioni d'involucro, calcolo delle energie incorporate attribuibili ai materiali sostituiti secondo piani di sostituzione programmati nella vita utile degli edifici – *IMPATTI DELLA FASE DI MANUTENZIONE*
- k. Valutazione complessiva dell'energia consumata dai due edifici, per le sei tipologie d'involucro, nell'arco dell'intera vita utile: si confrontano e sommano le energie incorporate in fase di costruzione, l'energia consumata per la climatizzazione dell'edificio nella fase d'uso e le energie incorporate nei materiali o componenti sostituiti nei cicli di manutenzione;
- l. Approfondimento dei risultati per i due edifici, e considerazioni;

In questo trattato non si sono esplicitate alcune verifiche relative all'incidenza del decadimento di prestazione in relazione alla quota di energia consumata nell'intero ciclo di vita dell'involucro degli edifici. In realtà il degrado di componenti edilizi e di materiali nel tempo e l'influenza di temperatura e umidità per gli strati di materiale isolante influenzerebbero la valutazione ambientale dell'edificio, poiché cambierebbero sia il fabbisogno energetico per la climatizzazione dell'edificio nel tempo, sia l'energia per la manutenzione (Monticelli et alii, 2011).

#### **4.5.1. Le prestazioni termiche delle soluzioni d'involucro**

Nella prima fase di analisi sono state definite le dimensioni dei due edifici, la stratificazione delle sei tipologie di involucro e gli spessori, quindi le quantità di materiali utilizzati e le loro proprietà termiche, al fine di quantificare il fabbisogno di energia degli edifici durante la fase d'uso.

Il primo approccio alla valutazione è stato la definizione delle prestazioni termiche delle chiusure verticali campionate. Il valore di trasmittanza termica è stato calcolato secondo la procedura indicata dalla norma UNI EN ISO 6946 (2007) *"Resistenza termica e trasmittanza termica. Metodo di calcolo"*, al fine di individuarne la rispondenza ai valori limite imposti dal D. Lgs. n. 192/05 e s.m.i, per la soglia temporale del 2010 per la zona E in cui di localizzano gli edifici tipo. Per la verifica ai limiti di legge si considerano i valori contenuti nelle tabelle dell'Allegato C del decreto, senza fare riferimento alla prevista tolleranza di quei valori limite pari al 30% nel caso di verifica dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale.

Nello specifico, si è scelto il valore di trasmittanza, pari a  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ , e di conseguenza si sono costruite le soluzioni d'involucro: scelte le tipologie di laterizio per ogni soluzione tecnica, mantenute fisse le caratteristiche dimensionali e termiche degli altri strati, si è variato lo spessore dell'isolante, per compensare il valore termico da raggiungere. Quindi ogni tipo di involucro presenta la stessa trasmittanza, ma spessori e composizione differente, che vanno a incidere sugli altri valori termici e sulla massa superficiale.

Mantenere costante la prestazione termica è un punto saldo necessario per poter definire successivamente l'unità funzionale nel caso dell'analisi dell'impatto energetico per la costruzione delle diverse soluzioni d'involucro, come vedremo in seguito.

In regime stazionario, è stata verificata per ogni stratificazione anche la temperatura superficiale interna alla muratura, per controllare la formazione di umidità sulle superfici e la condensazione interstiziale mediante la verifica di Glaser<sup>1</sup>.

Si è poi proceduto a verificare il comportamento termico delle stratificazioni per quanto riguarda sfasamento e attenuazione adottando la procedura di calcolo riportata nella norma UNI EN ISO 13786 (2008) *"Prestazione termica dei componenti per edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodo di calcolo"*, relativa alla trasmissione del calore attraverso i componenti edilizi in regime dinamico periodico e sinusoidale, considerando le escursioni termiche durante un periodo di tempo stabilito. I valori termici dinamici così determinati fanno emergere il ruolo della massa nelle prestazioni energetiche delle murature. Da ultimo si è calcolata la trasmittanza termica periodica, verificando che i valori ottenuti fossero inferiori a  $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ , secondo quanto previsto dalle Linee Guida per la certificazione energetica (D.Lgs. 311/06, art. 6, comma 9). La trasmittanza termica periodica è il parametro che valuta la capacità di una parete di sfasare o attenuare il flusso termico che la attraversa nelle 24 ore ed è rappresentativa del comportamento della parete in regime termico dinamico. È calcolabile secondo il metodo descritto nella norma UNI EN ISO 13786.

---

1. Le grandezze fisiche considerate nel calcolo a regime stazionario, infatti, vengono influenzate dal contenuto igrometrico dei materiali che costituiscono la chiusura esterna. Questa caratteristica viene valutata quantitativamente mediante un "coefficiente di resistenza al passaggio del vapore"  $\mu$ , adimensionale, che indica di quanto la resistenza al passaggio del vapore, di un certo materiale, è superiore a quella dell'aria, a parità di spessore e di temperature (norma UNI 10351 (1994)).

I valori di resistenza termica indicati nelle tabelle di ogni stratificazione sono stati costruiti a partire dai valori riportati nei cartigli CE dei prodotti (quindi dal valore di  $\lambda_{eq}$  o di R del blocco) e sono stati corretti considerando il contributo dei giunti in malta sulle prestazioni termiche dello strato. Avendo come dato di base la conducibilità termica del blocco che la costituisce, per ottenere le prestazioni termiche di una muratura, è stato messo a punto un calcolo per determinare l'incidenza dei giunti in malta su un metro quadrato di parete<sup>2</sup>. Tale procedura è stata utilizzata nelle schede seguenti per il calcolo dei valori termici degli strati di muratura in laterizio. Per esempio, assumendo che da marcatura CE (calcolata con EN1745) un blocco da 30 cm di spessore abbia una conducibilità termica equivalente  $\lambda_{eq} = 0.203 \text{ W/mK}$  ( $R = s/\lambda = 0.30\text{m}/0.203\text{W/mK} = 1.477 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) e che la malta cementizia (secondo norma UNI EN 1745) abbia una conducibilità termica  $\lambda = 0.93 \text{ W/mK}$  ( $R = s/\lambda = 0.30\text{m}/0.93\text{W/mK} = 0.322 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) con massa volumica  $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ , per calcolare la resistenza termica della parete si procede per percentuale: 92.2% della resistenza del blocco ( $1.477 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) + 7.8% della resistenza della malta ( $0.322 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) =  $1.361 + 0.025 = 1.386 \text{ m}^2\text{K/W}$ . La percentuale di incidenza dei giunti, specifica per ogni dimensione di laterizi, è il risultato di questo tipo di calcolo.

Con riferimento alle tabelle, nella sezione relativa alle informazioni tecniche specifiche dei prodotti sono indicate le caratteristiche relative alla prestazione termica. La lettera P contrassegna blocchi portanti con una percentuale di foratura compresa tra 45 e 55% e spessore minimo di 25 cm; le lettere GV e GO stanno per giunto verticale, semplice o a incastro, e giunto orizzontale.

Il valore della massa superficiale, riportato tra i risultati delle valutazioni, comprende naturalmente anche il peso dei giunti di malta<sup>3</sup>. Si fornisce anche il valore di massa superficiale con l'esclusione degli intonaci, come richiesto dal D. Lgs. n. 192/05 e s.m.i.

Le valutazioni sono state condotte con valori di conducibilità termica equivalente dei blocchi in condizioni a secco; pertanto i risultati non considerano un eventuale ruolo dell'umidità<sup>4</sup>.

Tutte le specifiche tecniche relative agli strati superficiali interni, ai coefficienti liminari (interno ed esterno) sono stati mantenuti costanti. Il calore specifico dei materiali, grandezza correlata alla loro capacità termica, dato necessario per il calcolo dei valori di sfasamento e attenuazione dell'onda termica nella parete, è stato desunto dalla letteratura scientifica<sup>5</sup>. Relativamente alle stratificazioni con intercapedine d'aria tra l'isolamento e il paramento murario esterno, si è considerata, nel calcolo, l'intercapedine come ventilata (valore di resistenza termica con riferimento alla norma UNI EN ISO 6946:2007).

2. Si fa riferimento a una procedura definita nella ricerca "Prestazioni termiche e comportamento ambientale di soluzioni tecniche di involucro in laterizio finalizzate all'efficienza energetica degli edifici", condotta nel 2006 dal Dipartimento BEST del Politecnico di Milano per ANDIL. Per un approfondimento relativo all'incidenza dei giunti di malta sulle prestazioni termiche delle murature e sulla modalità di calcolo della relativa incidenza si rimanda a "Ricette di chiusura", di A. Campioli, S. Ferrari, M. Lavagna, C. Monticelli, E. Morello, in *Costruire*, n. 281, ott. 2006, pp. 165-180.

3. È obbligatorio che il valore di massa superficiale senza intonaco ( $\text{kg/m}^2$ ) delle pareti opache sia superiore a  $230 \text{ kg/m}^2$  (allegato I, punto 9 del D. Lgs. 311/06), per località con irradianza superiore a  $290 \text{ W/m}^2$ .

4. Bisogna porre attenzione alla presenza di umidità nelle murature in condizioni di esercizio: infatti, in relazione alla quantità di umidità, possono variare le prestazioni termiche.

5. Riferimenti bibliografici per i valori di calore specifico: norma UNI EN 12524 (2001) "Materiali e prodotti per edilizia - Proprietà igrometriche - Valori tabulati di progetto"; Steven Vajk Szokolay, *Introduzione alla progettazione sostenibile*, Milano, Hoepli, 2006.

Tipologia di involucro 1A			Specifiche strati					Specifiche parete						
Muratura monostrato con isolamento esterno			sp.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\epsilon}$	c	R	sp.	$R_{mur}$	$U_{mur}$	$M_s$	$\Delta t$	f	$Y_E$
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/KgK]	[m <sup>2</sup> KW]	[m]	[m <sup>2</sup> KW]	[W/m <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[h]	[h]	[W/m <sup>2</sup> K]
	I	Unità di misura												
	1	1/hi					0,123							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perite	0,015	1150	0,700	1010	0,02							
	strato 2	blocchi in laterizio 30x25x19 - GO e GV in malta termica 12 mm - P	0,3	790	0,193	1000	1,55							
	strato 3	isolante - natura minerale	0,05	155	0,036	1030	1,31	0,375	3,07	0,326	309,3	15,72	0,07	0,02
	strato 4	rete d'armatura in fibra di vetro e rasatura con collante cementizio	0,01	1300	0,750	670	0,01							
	strato 5	intonaco di finitura calce e cemento	0,003	1300	0,400	910	0,01							
E	1/he					0,043								

Nota: c e s dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario

Nota: e e  $\bar{\alpha}$  dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario


Tab. 4-4: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato di mattoni con isolamento termico.

Tipologia di involucro 1B			Specifiche strati					Specifiche parete						
Muratura a doppio strato con intercapedine isolata			sp.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\epsilon}$	c	R	sp.	$R_{mur}$	$U_{mur}$	$M_s$	$\Delta t$	f	$Y_E$
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	[m]	[Kg/m³]	[W/mK]	[J/KgK]	[m² KW]	[m]	[m² KW]	[W/m² K]	[kg/m²]	[h]	[h]	[W/m² K]
		Unità di misura												
	I	1/h					0,123							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,015	1150	0,700	1010	0,02							
	strato 2	blocchi in laterizio 15x50x19 GV incastro	0,15	805	0,250	1000	0,60							
	strato 3	isolante - natura minerale	0,06	155	0,036	1030	1,72							
	strato 4	intercapedine d'aria*	0,04	/	/	/	0,18							
	strato 5	aggrappante a base cementizia	0,01	1800	0,830	670	0,01	0,37	3,01	0,333	258,07	13,43	0,07	0,02
	strato 6	mattoni forati in laterizio 8x24x24 GV incastro	0,08	670	0,271	1000	0,28							
	strato 7	intonaco di fondo di calce e cemento	0,01	1530	0,550	910	0,02							
	strato 8	intonaco di finitura calce e cemento	0,003	1300	0,400	910	0,01							
E	1/he					0,043								

\*si fa riferimento al prospetto 2 del comma 5.3.1 della norma UNI EN ISO 6946


Nota: e e  $\bar{\alpha}$  dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario

Tab. 4-5: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata.

Tipologia di involucro 1C			Specifiche strati					Specifiche parete						
Muratura doppio strato, intercap. Isolata e mattoni faccia a vista			sp.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\epsilon}$	c	R	sp.	$R_{mur}$	$U_{mur}$	$M_s$	$\Delta t$	f	$Y_E$
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	[m]	[kg/m³]	[W/mK]	[J/KgK]	[m² KW]	[m]	[m² KW]	[W/m² K]	[kg/m²]	[h]	[h]	[W/m² K]
		Unità di misura												
	I	1/h					0,123							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,015	1150	0,700	1010	0,02							
	strato 2	mattoni forati in laterizio 20x22,5x40	0,2	690	0,210	1000	0,95							
	strato 3	isolante - natura minerale	0,05	155	0,036	1030	1,50							
	strato 4	aggrappante a base cementizia	0,01	1800	0,830	670	0,01	0,399	3,01	0,333	348,50	15,79	0,10	0,03
	strato 5	mattoni di laterizio estruso faccia a vista Ø=35%	0,12	1100	0,285	1000	0,35							
E	1/he						0,043							


Nota: e e  $\bar{\alpha}$  dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario

Tab. 4-6: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni faccia a vista.

Tipologia di involucro 1D		Specifiche strati						Specifiche parete						
Muratura a doppio strato con intercapedine - facciata ventilata		sp.	$\bar{\alpha}$	$\bar{\epsilon}$	c	R	sp.	R	U	M <sub>s</sub>	$\Delta t$	f	Y	
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	[m]	[kg/m³]	[W/mK]	[J/KgK]	[m² KW]	[m]	[m² KW]	[W/m² K]	[kg/m²]	[h]	[h]	[W/m² K]
	I	Unità di misura												
	1/h						0,123							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,015	1150	0,700	1010	0,02	0,435	2,96	0,338	351,28	18,42	0,00	0,00
	strato 2	blocchi in laterizio 25x30x22,5 GV incastro - P	0,30	900	0,190	1000	1,58							
	strato 3	isolante - natura minerale	0,04	155	0,036	1030	1,11							
	strato 3a	profili a C in acciaio passo 1 ml	/	/	/	/	/							
	strato 4	intercapedine d'aria*	0,04	/	/	/	0,00							
strato 5	paramento in tavole di laterizio*	0,04	1100	0,500	1000	0,00								
E	1/he						0,123							

\*si fa riferimento al comma 5.3.3 della norma UNI EN ISO 6946


Tab. 4-7: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro monostrato, isolamento esterno e rivestimento a tavole di cotto assemblate a secco.

Tipologia di involucro 1E			Specifiche strati					Specifiche parete						
Muratura monostrato intonacata														
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	sp.	$\rho$	$\lambda$	c	R	sp.	$R_{mur}$	$U_{mur}$	Ms	$\Delta t$	f	$Y_E$
		Unità di misura	[m]	[Kg/m³]	[W/KgK]	[J/KgK]	[m² KW]	[m]	[m² KW]	[W/m² K]	[kg/m² J]	[h]	[s]	[W/m² K]
	I	1/hi					0.123							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0.015	1150	0.700	1010	0.02							
	strato 2	blocchi in laterizio 24,7x36,5x24,9 rettificato con GV a incastro rettificato	0.365	800	0.160	1000	2.85							
	strato 3	intonaco di fondo di calce e cemento	0.01	1530	0.550	910	0.02							
	strato 4	intonaco di finitura calce e cemento	0.003	1300	0.400	910	0.01							
	E	1/he					0.043	0.393	3.06	0.326	341.5	20.03	0.04	0.01

Note: 1 e o dei laterizi sono riferiti al blocco; R è riferita al pannello murario.

Nota:  $\lambda$  e  $\rho$  dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario

Tab. 4-8: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato intonacato.

Tipologia di involucro 1F			Specifiche strati					Specifiche parete						
Involucro con sistema costruttivo a "secco"														
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strato	sp.	$\rho$	$\lambda$	c	R	sp.	$R_{mur}$	$U_{mur}$	Ms	$\Delta t$	f	$Y_E$
		Unità di misura	[m]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/KgK]	[m <sup>2</sup> KW]	[m]	[m <sup>2</sup> KW]	[W/m <sup>2</sup> K]	[kg/m <sup>2</sup> J]	[h]	[s]	[W/m <sup>2</sup> K]
	I	1/hi												
	strato 1	cartongesso	0.025	900	0.210	837	0.12	0.172	3.05	0.328	42.87	3.28	0.89	0.29
	strato 2	isolante - natura minerale	0.09	155	0.036	1030	2.58							
	strato 3	intercapedine d'aria*	0.05	/	/	/	0.18							
	strato 4	rivestimento in pannelli di Al	0.001	2700	160.000	880	0.000							
	strato 5	LDPE nero	0.0025	666	0.500	1800	0.005							
	E	1/he						0.043						

\*si fa riferimento al prospetto 2 del comma 5.3.1 della norma UNI EN ISO 6946

Nota:  $\lambda$  e  $\rho$  dei laterizi sono riferite al blocco; R è riferita al paramento murario

Tab. 4-9: Specifiche termiche e stratificazione degli strati componenti la tipologia di involucro con sistema costruttivo leggero e totalmente "a secco".

Dalle valutazioni condotte sulle prestazioni termiche delle soluzioni considerate, possono essere tratte alcune considerazioni, con una premessa sui risultati ottenuti: questi sono strettamente legati alle stratificazioni indicate e alla scelta di specifici blocchi in laterizio. In tal caso gli stessi valori termici sono ottenuti anche con soluzioni d'involucro di spessore differente (ovvero con altri componenti). Tuttavia, al contrario, si possono avere risultati differenti da quelli qui riportati, seppur con lo stesso spessore, qualora si utilizzino prodotti con prestazioni termiche, modalità e materiali per la posa in opera differenti. Ogni prodotto può variare la propria prestazione termica in relazione a numerose variabili:

- per i blocchi di laterizio: densità e conducibilità termica dell'impasto in argilla, percentuale di foratura, geometria dei fori;
- per le murature, inoltre, vi sono differenze a seconda del tipo di giunto (normale, a incastro, rettificato) e del tipo di malta usato per i giunti (normale o isolante);
- per i pannelli isolanti: densità e conducibilità termica del materiale isolante, struttura a celle aperte o chiuse.

Complessivamente, le soluzioni massive (dalla tipologia A alla E) presentano valori di massa superficiale superiori ai 230 kg/m², limite indicato nel D. Lgs. 192/05 e s.m.i. con lo scopo di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di garantire un maggior comfort termico. Per quanto riguarda la soluzione F, di tipo leggero, la massa superficiale è piuttosto bassa, infatti tale soluzione è favorevole per la climatizzazione invernale, a scapito di un eventuale discomfort interno estivo, conseguenza di una bassa inerzia termica della parete perimetrale. Si può osservare in particolare come a fronte dell'aumento della massa superficiale corrisponda un aumento dello sfasamento e una riduzione dell'attenuazione.

La verifica di Glaser è positiva per tutte le murature valutate: quindi non vi è il rischio di formazione di condensa interstiziale. In ogni caso è necessaria una particolare attenzione nella esecuzione della muratura, per evitare cadute prestazionali che potrebbero portare alla formazione di condensa, rispetto alle previsioni progettuali. L'ordine degli strati nella sezione muraria, in regime stazionario, non altera il comportamento termico, avendo significato solo per quanto riguarda la possibilità di formazione di condensa. Gli effetti sul comportamento dinamico possono invece essere rilevanti: è importante comprendere la corretta distribuzione degli strati, in particolare la posizione degli strati massivi, e valutare l'effetto combinato di questi con gli isolanti termici. La posizione dello strato isolante influisce sul comportamento in regime dinamico, soprattutto sul fattore di attenuazione, mentre ha poca influenza sul ritardo temporale<sup>6</sup>.

Dalla considerazione della variabile tempo emergono altri spunti di riflessione: le tipologie di involucro hanno la stessa trasmittanza termica e presentano lo stesso comportamento dal punto di vista della riduzione della dispersione di calore verso l'esterno, ma presentano un comportamento molto differente dal punto di vista della conservazione del calore accumulato. Tutte le soluzioni sono caratterizzate da fattori di attenuazione e sfasamenti interessanti. Non esistono, in realtà, prescrizioni normative di valori di attenuazione e sfasamento conformi; possibili valori di riferimento possono essere tratti dal Protocollo Itaca (al punto 1.3.2 - Inerzia termica, aprile 2007), in cui è consigliato un valore di sfasamento minimo di 8 ore e un fattore di attenuazione  $\leq$  di 0,35, per ottenere un punteggio corrispondente alla sufficienza. Per la situazione estiva, in letteratura, si riscontra che valori prossimi alle 12 ore di sfasamento sono raccomandabili e performanti: gli ambienti interni vengono raggiunti dalla temperatura esterna più elevata solo durante la notte, con un ritardo di 12 ore, quando ormai la temperatura esterna si è abbassata verso valori minimi. Come già anticipato la tipologia F si presenta come critica da questo ultimo punto di vista. Mentre le altre soluzioni d'involucro soddisfano pienamente i valori consigliati per la situazione di comfort estivo.

#### **4.5.2. I flussi di materia e di energia incorporata per ogni subsistema degli edifici**

La seconda fase ha affrontato la quantificazione della energia incorporata di ogni subsistema (solaio controterra, involucro, serramenti e copertura) e la somma delle rispettive energie incorporate ha generato la quantità totale per i casi di studio. La massa superficiale di materiali e componenti ( $\text{kg/m}^2$ ) e le aree delle superfici dei subsistemi degli edifici sono stati necessari al fine del calcolo dell'energia incorporata totale. In merito al computo dell'energia incorporata è necessario conoscere la quantità di energia per produrre ogni singolo componente e/o materiale coinvolto nei sub sistemi e nell'edificio, la quantità di energia consumata dai macchinari, dal lavoro umano ecc. Il computo dell'energia incorporata tiene conto delle seguenti fasi del processo edilizio, a monte della fase d'uso: la fase di estrazione delle materie prime, il trasporto dei materiali allo stabilimento produttivo, le fasi di lavorazione e produzione, trasporto dalla fabbrica al cantiere e la messa in opera; è la quantità di energia non rinnovabile spesa per la realizzazione di una unità di materiale, componente o sistema. Procedere attraverso dati primari al computo dell'energia incorporata implica un lavoro complesso e coinvolge numerose fonti di dati e competenze,

6. Asan H., "Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view", *Energy and Buildings*, n. 32, 2000, pp. 197-203.



che esulano dalla competenza stretta dei progettisti. A supporto di questi ultimi, esistono dati secondari in letteratura, calcolati sulla media della produzione dei comparti industriali, ricavabili in alcuni *data base*. I *data base* disponibili, per la maggior parte, fanno riferimento a situazioni produttive straniere. Tali contesti sono sicuramente diversi da quello italiano; per cui i dati potrebbero non essere totalmente pertinenti in valutazioni di edifici costruiti nel nostro territorio. Va tuttavia constatato come la gamma di materiali edilizi presenti sul mercato italiano non sia così facilmente circoscrivibile alla produzione industriale edilizia nazionale: spesso si fa riferimento a prodotti che vengono confezionati all'estero e sono messi in opera in Italia.

Nel computo dell'energie incorporate delle sei soluzioni d'involucro si è fatto riferimento alla banca dati anglosassone *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, elaborata dai proff. G. Hammond & C. Jones dell'Università di Bath, del *Sustainable Energy Research Team (SERT)*, Dept. of mechanical Engineering. L'obiettivo di questa banca dati era finalizzato a formulare un inventario di coefficienti di energia incorporata (*EE – Embodied Energy*) e di emissioni di anidride carbonica (*EC – Embodied Carbon*) per i materiali edilizi. Raccoglie la maggior parte delle informazioni da dati secondari di letteratura, da articoli scientifici, studi di valutazioni di impatto ambientale LCA, libri, articoli di conferenze. Nella versione 1.6a il *database* contempla 1700 documenti sull'energia incorporata di materiali e si struttura in 34 gruppi materici principali (aggregati, alluminio, asfalto, bitume, cemento, materiali ceramici, ...) e per ogni materiale principale è stato definito un profilo ambientale. I limiti del sistema delle voci di inventario riportate nella ICE sono specificati in ogni scheda di materiale e considerano le fasi dal reperimento delle materie prime al prodotto finito stoccato in azienda.

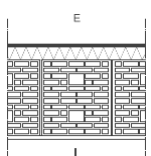
Dopo una cernita dei profili ambientali dei materiali della banca dati ICE, si sono scelte le voci corrispondenti a ogni tipologia di materiale e componente utilizzati nelle stratificazioni, per procedere al calcolo dell'energia incorporata. Si riporta la rielaborazione della banca dati, strumento base per la valutazione delle tipologie studiate.

In questa fase della ricerca, in cui si computano le energie incorporate per ogni soluzione di involucro tipo, l'analisi ambientale è finalizzata all'individuazione il livello di eco-efficienza delle tipologie individuate, ovvero comprendere quale sia quella a minor impatto ambientale a parità di prestazione termica. Si confrontano le tipologie di muratura secondo l'unità funzionale di trasmittanza termica pari a  $U = 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ , per un metro quadrato di superficie di chiusura verticale opaca. Quindi nel procedimento di calcolo dell'energia incorporata si definisce per ogni stratificazione, e a cascata per ogni componente costituente la stessa, il flusso di materiale coinvolto, da analizzare nella valutazione ambientale, per soddisfare la parità di prestazione. Per calcolare il flusso di riferimento si individua lo spessore di ogni strato e si calcola la quantità in peso di materiale impiegato in un metro quadrato, conoscendo il valore di densità del materiale corrispondente lo strato. L'energia incorporata relativa al metro quadrato di superficie è il risultato della somma delle parziali di ogni strato o componente coinvolto nella muratura. Di seguito si riportano le tabelle di calcolo elettronico per ogni tipologia di involucro, in cui sono riscontrabili gli strati già indicati nelle tabelle dei calcoli delle prestazioni termiche e anche alcuni componenti, che avevano influsso rilevante ai fini del calcolo termico, ma che contribuiscono nel calcolo delle energie incorporate, con il loro peso e la loro filiera produttiva.

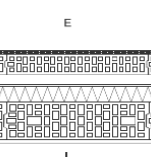
La stessa procedura è stata condotta per il calcolo dell'energia incorporata degli altri sub-sistemi d'involucro, che verranno poi considerati nella valutazione degli edifici tipo nei paragrafi successivi. Per cui si riportano gli stralci dei fogli di calcolo con i valori di energia incorporata per il solaio di copertura, il solaio contro terra, le chiusure verticali perimetrali trasparenti (i serramenti) e il solaio tipo interpiano (per la tipologia multi piano a torre).

Descrizione del materiale/strato	Voce da banca dati ICE 1.6a	EE [MJ/Kg]	EC [KgCO <sub>2</sub> /Kg]
<i>. per le tipologie di involucro verticale</i>			
1 intonaco calce, gesso e perlite	Plaster_general gypsum	1,80	0,12
2 blocchi in laterizio	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
3 blocchi di laterizio estruso faccia a vista	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
4 tavole di laterizio	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
5 malta	Cement_mortar (1:3 cement sand mix)	1,40	0,213
6 isolante - natura minerale	Insulation_rockwool (stone wool)	16,80	1,05
7 rasatura con collante cementizio	Cement_general (Typical)	4,60	0,83
8 aggrappante a base cementizia	Cement_general (Typical)	4,60	0,83
9 rete d'armatura in fibra di vetro	Glass_fiberglass	28,00	1,53
10 intonaco di fondo calce e cemento	Cement_mortar (1:½:4½ Cement:Lime:Sand mix)	1,37	0,196
11 intonaco di finitura calce e cemento	Cement_mortar (1:½:4½ Cement:Lime:Sand mix)	1,37	0,196
12 profili a C in acciaio passo 1 ml	Steel_general_virgin	35,30	2,75
13 cartongesso	Plaster_plasterboard	6,75	0,38
14 profili in alluminio vert. passo 1ml	Aluminium_general_virgin	217,00	11,46
15 vite d'aggancio rivestimento( 8 in 1ml)	Steel_general_virgin	35,30	2,75
16 rivestimento in pannelli di Al	Aluminium_general_virgin	217,00	11,46
17 LDPE nero	Plastics_LDPE Film	89,30	1,9
<i>. per il solaio di copertura</i>			
1 intonaco calce, gesso e perlite	Plaster_general gypsum	1,80	0,12
2 solaio laterocemento:pignatte	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
3 solaio laterocemento:ferro	Steel_bar & rod_virgin	24,60	1,71
4 solaio laterocemento:calcestruzzo	Concrete_general	0,95	0,13
5 isolante - natura minerale	Insulation_rockwool (stone wool)	16,80	1,05
6 guaina bituminosa	Bitumen_general	47,00	0,48
7 strato di ghiaia	Sand_general	0,10	0,005
<i>. per il solaio contro terra</i>			
1 pavimento ceramico	Ceramics_general	10,00	0,65
2 massetto cls. con argilla espansa	Concrete_1:1,5:3 Cement:Sand: Aggregate	1,11	0,159
3 isolante - natura minerale	Insulation_rockwool (stone wool)	16,80	1,05
4 guaina impermeabilizzante	Bitumen_general	47,00	0,48
5 solaio laterocemento:pignatte	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
6 solaio laterocemento:ferro	Steel_bar & rod_virgin	24,60	1,71
7 solaio laterocemento:calcestruzzo	Concrete_general	0,95	0,13
8 strato di ghiaia	Sand_general	0,10	0,005
<i>. per il solaio interpiano</i>			
1 intonaco calce, gesso e perlite	Plaster_general gypsum	1,80	0,12
2 solaio laterocemento:pignatte	Clay_general (Simple Baked Products)	3,00	0,22
3 solaio laterocemento:ferro	Steel_bar & rod_virgin	24,60	1,71
4 solaio laterocemento:calcestruzzo	Concrete_general	0,95	0,13
5 isolante - natura minerale	Insulation_rockwool (stone wool)	16,80	1,05
6 massetto cls. con argilla espansa	Concrete_1:1,5:3 Cement:Sand: Aggregate	1,11	0,159
7 pavimento ceramico	Ceramics_general	10,00	0,65
<i>. per i serramenti in legno - alluminio</i>			
1 parte del telaio in legno	Timber_general	8,50	0,46
2 parte del telaio in alluminio	Aluminium_extruded_virgin	155,00	8,24
3 vetro	Glass_general	15,00	0,85

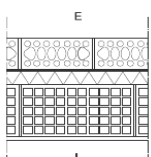
Fig. 4-5: Rielaborazione dalla banca dati ICE nel foglio di calcolo per la valutazione delle tipologie d'involucro.

Tipologia di involucro 1A							
Muratura monostrato con isolamento esterno							
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato
			[m/m³]	[Kg/m³]	[kg/m²]	[MJ/Kg]	[MJ/m²]
	I						
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,02	1150	17,25	1,80	31,05
	strato 2	blocchi in laterizio 30x25x19	0,30	790	214,25	3,00	642,75
	strato 2a	malta	0,04	1800	51,84	1,40	72,58
	strato 3	isolante - natura minerale	0,05	155	7,75	16,80	130,20
	strato 4	rasatura con collante cementizio	0,01	1300	13,00	4,60	59,80
	strato 4a	rete d'armatura in fibra di vetro	0,0005*	2600	1,30	28,00	36,40
	strato 5	intonaco di finitura calce e cemento	0,003	1300	3,90	1,37	5,34
E							
* volume del profilo di rete							

Tab. 4-10 Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato di mattoni con isolamento termico.

Tipologia di involucro 1B							
Muratura a doppio strato con intercapedine isolata							
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato
			[m/m³]	[Kg/m³]	[kg/m²]	[MJ/Kg]	[MJ/m²]
	I						
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,02	1150	17,25	1,80	31,05
	strato 2	blocchi in laterizio 15x50x19 inc.	0,15	805	108,90	3,00	326,70
	strato 2a	malta	0,02	1800	23,10	1,40	32,34
	strato 3	isolante - natura minerale	0,06	155	9,30	16,80	156,24
	strato 4	intercapedine d'aria	0 - 0,05	/	/	/	/
	strato 5	aggrappante a base cementizia	0,01	1800	18,00	4,60	82,80
	strato 6	mattoni forati in laterizio 8x24x24	0,08	670	48,50	3,00	145,50
	strato 6a	malta	0,01	1800	13,82	1,40	19,35
	strato 7	intonaco di fondo calce e cemento	0,01	1530	15,30	1,37	20,96
	strato 8	intonaco di finitura calce e cemento	0,003	1300	3,90	1,37	5,34
E							

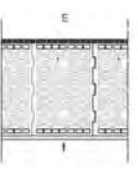
Tab. 4-11 Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata.

Tipologia di involucro 1C							
Muratura a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni estrusi faccia a vista							
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato
			[m/m³]	[Kg/m³]	[kg/m²]	[MJ/Kg]	[MJ/m²]
	I						
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,02	1150	17,25	1,80	31,05
	strato 2	mattoni forati in laterizio 20x22,5x40	0,20	690	128,00	3,00	384,00
	strato 2a	malta	0,02	1800	26,00	1,40	36,40
	strato 3	isolante - natura minerale	0,05	155	7,75	16,80	130,20
	strato 4	aggrappante a base cementizia	0,01	1800	18,00	4,60	82,80
	strato 5	mattoni di laterizio estruso faccia a vista $\phi=35\%$	0,12	1100	102,00	3,00	306,00
	strato 5a	malta	0,01	1800	49,50	1,40	69,30
E							

Tab. 4-12 Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni faccia a vista.

Tipologia di involucro 1D							
Muratura a doppio strato con intercapedine - facciata ventilata							
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato
			[m/m³]	[Kg/m³]	[kg/m²]	[MJ/Kg]	[MJ/m²]
	I						
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,02	1150	17,25	1,80	31,05
	strato 2	blocchi in laterizio 25x30x22,5	0,30	900	257,00	3,00	771,00
	strato 2a	malta	0,02	1800	26,00	1,40	36,40
	strato 3	isolante - natura minerale	0,04	155	6,20	16,80	104,16
	strato 3a	profili a C in acciaio passo 1 ml	0,00	7800	0,83	35,30	29,46
	strato 5	intercapedine d'aria*	0,07	/	/	/	/
	strato 6	paramento in tavole di laterizio	0,04	1100	44,00	3,00	132,00
E							


Tab. 4-13 Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro monostrato, isolamento esterno e rivestimento a tavole di cotto assemblate a secco.

Tipologia di involucro 1E								
Muratura monostrato intonacata								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
	I							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0.015	1150	17.25	1.80	31.05	940.27
	strato 2	blocchi in laterizio 30x25x19 - giunti in malta termica 12 mm.	0.365	800	279.00	3.00	837.00	
	strato 2a	malta	0.04	1800	32.80	1.40	45.92	
	strato 3	intonaco di fondo calce e cemento	0.01	1530	15.30	1.37	20.96	
	strato 4	intonaco di finitura calce e cemento	0.003	1300	3.90	1.37	5.34	
E								
* volume del profilo di rete								


Tab. 4-14: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro in monostrato intonacato

Tipologia di involucro 1F								
Involucro con sistema costruttivo a "secco"								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
<div>E</div> <div></div> <div>I</div>		I						1410.07
	strato 1	cartongesso	0.03	900	22.50	6.75	151.88	
	strato 1a	profili a C in acciaio passo 1 ml	0.00	7800	0.83	35.30	29.46	
	strato 2	isolante - natura minerale	0.09	155	13.95	16.80	234.36	
	strato 2a	profili in alluminio vert. passo 1ml	0.0004	2700	1.19	217.00	258.97	
	strato 2b	vite d'aggancio rivestimento( 8 in 1ml)	0.000003	7800	0.02	35.30	0.83	
	strato 3	intercapedine d'aria	0.05	/	/	/	/	
	strato 4	rivestimento in pannelli di Al	0.001	2700	2.70	217.00	585.90	
	strato 5	LDPE nero	0.0025	666	1.67	89.30	148.68	
		E						

Tab. 4-15: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di involucro con sistema costruttivo leggero e totalmente "a secco"

Tipologia di copertura piana								
Solaio in laterocemento isolato con strato di ghiaia di finitura								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
	I							
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,015	1150	17,25	1,80	31,05	2441,05
	strato 2	solaio laterocemento:pignatte	0,180	360	73,00	3,00	219,00	
	strato 2a	solaio laterocemento:ferro		7800	50,00	24,60	1230,00	
	strato 2b	solaio laterocemento:calcestruzzo		2400	80,00	0,95	76,00	
	strato 3	isolante - natura minerale	0,10	155	15,50	16,80	260,40	
	strato 4	guaina bituminosa**	0,01	1300	13,00	47,00	611,00	
	strato 5	strato di ghiaia	0,08	1700	136,00	0,10	13,60	
	E							

Tab. 4-16: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio di copertura piana

Tipologia di solaio controterra								
Solaio controterra isolato								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
	I							
	strato 1	pavimento ceramico	0,015	2300	34,50	10,00	345,00	3491,47
	strato 2	massetto cls. con argilla espansa	0,06	800	48,00	1,11	53,28	
	strato 3	isolante - natura minerale	0,08	155	13,02	16,80	218,74	
	strato 4	guaina impermeabilizzante	0,01	1300	13,00	47,00	611,00	
	strato 5	solaio laterocemento:pignatte	0,26	360	105,00	3,00	315,00	
	strato 5a	solaio laterocemento:ferro		7800	72,00	24,60	1771,20	
	strato 5b	solaio laterocemento:calcestruzzo		2400	115,00	0,95	109,25	
	strato 6	strato di ghiaia	0,40	1700	680,00	0,10	68,00	
E								

Tab. 4-17: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio controterra

Tipologia di chiusura verticale trasparente								
Serramento con telaio in alluminio e legno e vetro selettivo pirolitico (115x163)								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
	strato 1	parte del telaio in legno	-	2300	27,30	8,50	232,05	1350,05
	strato 2	parte del telaio in alluminio	-	2300	4,60	155,00	713,00	
	strato 3	vetro	-	2300	27,00	15,00	405,00	

Tab. 4-18: Energia incorporata negli elementi tecnici costituenti i serramenti vetrati

Tipologia di solaio piano								
Solaio interpiano in laterocemento isolato								
stratigrafia pacchetto	N° strato	descrizione strati	spessore/ volume	$\rho$	U.F.	EE materiale	EE strato	EE tot./m <sup>2</sup> di parete
			[m/m <sup>3</sup> ]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[MJ/Kg]	[MJ/m <sup>2</sup> ]	[MJ/m <sup>2</sup> ]
	intradosso							2066,77
	strato 1	intonaco calce, gesso e perlite	0,015	1150	17,25	1,80	31,05	
	strato 2	solaio laterocemento:pignatte	0,180	360	73,00	3,00	219,00	
	strato 2a	solaio laterocemento:ferro		7800	50,00	24,60	1230,00	
	strato 2b	solaio laterocemento:calcestruzzo		2400	80,00	0,95	76,00	
	strato 3	isolante - natura minerale	0,05	155	7,75	16,80	130,20	
	strato 4	massetto cls. con argilla espansa	0,04	800	32,00	1,11	35,52	
	strato 5	pavimento ceramico	0,015	2300	34,50	10,00	345,00	
	estradosso							

Tab. 4-19: Energia incorporata negli strati componenti la tipologia di solaio interpiano nella tipologia edilizia a torre

#### 4.5.3. I flussi di materia e di energia incorporata nella costruzione dell'involucro dell'edificio

L'energia incorporata dell'edificio è l'esito del calcolo che somma le quote parte di EE relative ai vari sub sistemi, quindi è l'energia spesa per produrre tutti i componenti, gli elementi e i materiali che compongono tutti i sub sistemi del manufatto edilizio. Solitamente nel computo delle EE per la costruzione dell'edificio si considerano anche le energie spese nella fase di cantiere e i materiali provvisori usati, ma in questo caso sono state omesse.

Nello specifico di questa analisi per energia incorporata dell'involucro dell'edificio si intende la somma dell'energia incorporata per la produzione del sub sistema delle chiusure verticali opache e trasparenti, per il sub sistema delle chiusure inferiori (contro il terreno) e superiori (copertura). Nel caso dell'edificio monopiano non c'è alcun solaio intermedio, mentre nella torre pluripiano, nella fase di confronto delle EE fra i due manufatti edilizi, si computano le EE dei solai interpiano.

Passando dalla scala del sub sistema alla scala dell'edificio è indispensabile ridefinire l'unità funzionale di riferimento, che consenta di confrontare poi l'energia incorporata nell'edificio con l'energia per la sua gestione. Quindi se fino ad ora, per il confronto fra le diverse tipologie di chiusura verticale, l'U.F. è stata la superficie verticale di 1 m<sup>2</sup> di involucro opaco, passando alla scala dell'edificio l'unità funzionale efficace per il successivo confronto con le energie di gestione è la superficie utile (superficie lorda – superficie occupata dello spessore dei muri) e, nello specifico, 1 m<sup>2</sup> di superficie utile. La scelta di questa U.F. si adatta anche al calcolo dei consumi energetici in fase di gestione, infatti il fabbisogno energetico dell'edificio può essere espresso in kWh/m<sup>2</sup> o MJ/m<sup>2</sup>, e per m<sup>2</sup> si intende proprio la superficie utile.

Quindi la procedura seguita per definire le energie incorporate per gli edifici oggetto di studio e i relativi involucri è la seguente:

1. calcolo dell'EE del subsistema delle *chiusure perimetrali verticali opache*: il valore di EE di 1 m<sup>2</sup> di stratificazione muraria prevista per la chiusura verticale opaca viene moltiplicato per la superficie di involucro opaca. Tale operazione è stata condotta per le

sei tipologie di stratificazione muraria. Si ottiene il valore di EE tot. di involucro verticale opaco dell'edificio (MJ/edificio). Il valore totale viene normalizzato, ovvero diviso per la superficie utile dell'edificio. Si ottiene il valore normalizzato per un m<sup>2</sup> di superficie utile (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).

2. calcolo dell'EE del subsistema della *chiusure orizzontale superiore*: il valore di EE di 1 m<sup>2</sup> di stratificazione prevista per il solaio di copertura viene moltiplicato per la superficie di totale del solaio. Si ottiene il valore di EE tot. della copertura dell'edificio (MJ/edificio).
3. il valore totale viene normalizzato, ovvero diviso per la superficie utile dell'edificio. Si ottiene il valore normalizzato per un m<sup>2</sup> di superficie utile (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).
4. calcolo dell'EE del subsistema della *chiusure orizzontale inferiore*: il valore di EE di 1 m<sup>2</sup> di stratificazione prevista per il solaio contro-terra viene moltiplicato per la superficie di totale del solaio. Si ottiene il valore di EE tot. del solaio contro terra dell'edificio (MJ/edificio). Il valore totale viene normalizzato, ovvero diviso per la superficie utile dell'edificio. Si ottiene il valore normalizzato per un m<sup>2</sup> di superficie utile (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).
5. calcolo dell'EE del subsistema delle *chiusure perimetrali verticali trasparenti*: il valore di EE per la produzione di un serramenti in legno alluminio di dimensioni 115 x 163 cm viene moltiplicato per il numero totale dei serramenti dell'edificio. Si ottiene il valore di EE tot. delle chiusure verticali trasparenti dell'edificio (MJ/edificio). Il valore totale viene normalizzato, ovvero diviso per la superficie utile dell'edificio. Si ottiene il valore normalizzato per un m<sup>2</sup> di superficie utile (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).
6. nel caso dell'edificio a torre multi piano - calcolo dell'EE del subsistema delle *chiusure orizzontali interpiano*: il valore di EE di 1 m<sup>2</sup> di stratificazione prevista per il solaio interpiano viene moltiplicato per la superficie di totale del solaio. Si ottiene il valore di EE tot. dei solai interpiano contenuti nell'edificio (MJ/edificio). Il valore totale viene normalizzato, ovvero diviso per la superficie utile dell'edificio. Si ottiene il valore normalizzato per un m<sup>2</sup> di superficie utile (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).
7. sommando i valori di EE di ogni subsistema si ottiene il valore totale dell'energia incorporata per la realizzazione dell'involucro per le due tipologie edilizie: e se nuovamente si divide il valore totale per il valore di superficie utile, si ottiene il valore normalizzato dell'impatto energetico della costruzione dell'edificio (MJ/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>).

#### **4.5.3.1 Energia incorporata nella costruzione dell'edificio unifamiliare monopiano**

Le sei tipologie di involucro sono state applicate alla tipologia edilizia unifamiliare monopiano, definendo i casi di studio: edificio 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F.

Dal valore unitario della parete, si sono calcolati i valori di EE totale dei diversi sub sistemi degli edifici. Come premesso, la variabile è costituita dall'involucro verticale opaco, mentre gli altri sub sistemi d'involucro rimangono costanti.

La superficie di chiusura perimetrale verticale opaca è di 160,5 m<sup>2</sup>; per cui il valore unitario di EE parete è stato moltiplicato per questo valore e diviso per la superficie utile degli edifici. La superficie utile varia tra i casi 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, poiché lo spessore delle murature messe in opera, posizionate sul filo esterno del perimetro dell'edificio, è differente per ognuna, quindi le superfici utili hanno dimensioni diverse:

caso 1A: S<sub>u</sub> = 131,81 m<sup>2</sup>

caso 1B: S<sub>u</sub> = 130,69 m<sup>2</sup>

caso 1C: S<sub>u</sub> = 132,05 m<sup>2</sup>

caso 1D:  $S_u = 129,01 \text{ m}^2$

caso 1E:  $S_u = 130,97 \text{ m}^2$

caso 1F:  $S_u = 141,54 \text{ m}^2$

La superficie di chiusura perimetrale verticale trasparente è di  $18,7 \text{ m}^2$ , sommatoria della superficie di 10 serramenti. La superficie di chiusura orizzontale superiore è di  $150 \text{ m}^2$ . La superficie di chiusura orizzontale inferiore è di  $150 \text{ m}^2$ .

#### **4.5.3.2 Energia incorporata nella costruzione dell'edificio a torre pluripiano**

Le sei tipologie di involucro sono state applicate alla tipologia edilizia a torre pluripiano, definendo i seguenti casi di studio: edificio 2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F.

Dal valore unitario della parete, si sono calcolati i valori di EE totale dei diversi sub sistemi degli edifici. Come premesso, la variabile è costituita dall'involucro verticale opaco, mentre gli altri sub sistemi d'involucro rimangono costanti.

La superficie di chiusura perimetrale verticale opaca è di  $3266,56 \text{ m}^2$ ; per cui il valore unitario di EE parete è stato moltiplicato per questo valore e diviso per la superficie utile degli edifici. Come per la casistica affrontata precedentemente, la superficie utile riscaldata varia tra i casi 2A, 2B, 2C, 2D, 2E, 2F, poiché lo spessore delle murature messe in opera, posizionate sul filo esterno del perimetro dell'edificio, è differente per ognuna, quindi le superfici utili riscaldate hanno dimensioni diverse:

caso 2A:  $S_u = 5985,00 \text{ m}^2$

caso 2B:  $S_u = 5992,12 \text{ m}^2$

caso 2C:  $S_u = 5950,86 \text{ m}^2$

caso 2D:  $S_u = 5899,79 \text{ m}^2$

caso 2E:  $S_u = 5959,39 \text{ m}^2$

caso 2F:  $S_u = 6277,43 \text{ m}^2$

I valori di superficie utile, ci cui sopra, sono il risultato della sottrazione dalla superficie totale lorda di pavimento della superficie occupata dalla muratura (variabile per ogni tipologia di stratificazione) e dell'area del vano scale ( $36 \text{ m}^2$ ) e del corridoio di distribuzione agli appartamenti.

La superficie di chiusura perimetrale verticale trasparente è di  $1196,8 \text{ m}^2$ , sommatoria della superficie di 640 serramenti.

La superficie di chiusura orizzontale superiore è di  $529 \text{ m}^2$ .

La superficie di chiusura orizzontale inferiore è di  $529 \text{ m}^2$ .

#### **4.5.4. I flussi di energia per il riscaldamento e il raffrescamento**

La terza fase ha affrontato il calcolo del fabbisogno energetico per riscaldamento e per raffrescamento al fine di mantenere le condizioni di temperatura interna previste ( $20^\circ\text{C}$  in inverno,  $26^\circ\text{C}$  in estate) in ogni edificio durante l'anno. Si sono considerati i dati climatici da UNI 10349:1994 con una localizzazione degli edifici a Milano. Nel calcolo dell'energia per la climatizzazione degli edifici sono stati considerati la dispersione per ventilazione e i guadagni termici solari attraverso le finestre, le proprietà ottiche del vetro, gli effetti di ombreggiamento da schermature e l'apporto di calore da altre fonti interne. È stato preso in considerazione il contributo della radiazione infrarossa nello scambio termico dell'involucro, insieme ai guadagni solari termici su elementi opachi (considerando un coefficiente di

assorbimento solare attorno a 0,6). I ponti termici sono stati calcolati secondo la norma ISO 14683:2007: quelli tra i pilastri e quelli relativi alle pareti interne sono stati trascurati. Il contributo del terreno è stato definito secondo le norme ISO 13370:2007 e la capacità termica secondo la norma ISO 13786:2007 (calcolando la capacità termica areica interna e dei componenti della struttura dell'edificio). In entrambi gli edifici, sono stati considerati i seguenti valori di trasmittanza termica:  $U=0,204 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  per il solaio contro terra della casa unifamiliare e  $U=0,183 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  per quello della torre,  $U=0,30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  per la copertura,  $U=1,685 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  per i serramenti,  $U=0,33 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  per le pareti esterne. Per ottenere i valori di fabbisogno energetico primario FEP, sono state prese in considerazione le efficienze dell'impianto di riscaldamento invernale (gas metano) e di raffrescamento estivo (pompa di calore elettrica). Nel caso del riscaldamento si è considerato un valore di rendimento termico utile  $\eta_{TU}$  (rapporto tra la potenza termica utile e la potenza termica del focolare), di una caldaia a condensazione alimentata a gas metano, con potenza termica nominale  $P_n$  al focolare di 15 kW, pari a 0,79 per la casa unifamiliare e per la torre un rendimento termico utile  $\eta_{TU}$  di una caldaia a condensazione centralizzata alimentata a gas metano, con potenza termica nominale  $P_n$  al focolare superiore a 1000 kW, pari a 0,84. Nel caso del raffrescamento un valore di coefficiente di prestazione COP (rapporto tra la potenza termica utile resa e la potenza elettrica assorbita di una pompa di calore elettrica) di un condizionatore d'aria elettrico (pompa di calore), sia per l'edificio unifamiliare che per l'edificio a torre, pari a 2,5. Per esprimere l'energia elettrica in termini di energia primaria, si sono utilizzati i fattori per ottenere il valore di energia primaria totale dai valori di energia termica, attualmente in vigore (Reg. Lombardia): 1 per i combustibili fossili, ovvero per il riscaldamento invernale, 2,18 per i dispositivi elettrici, ovvero per il condizionamento estivo. Nella valutazione non si sono considerati il consumo di energia per l'illuminazione e la produzione di acqua calda sanitaria. I risultati ottenuti sono stati normalizzati sulla superficie lorda di pavimento climatizzata, in termini di indicatori di prestazione energetica [kWh/m<sup>2</sup>].

#### **4.5.5. Indagine sulla durabilità e sui cicli di manutenzione dei materiali e componenti**

La quarta fase è consistita nella valutazione nel ciclo di vita utile dell'edificio del contributo energetico delle operazioni di manutenzione, quindi l'incidenza dell'impatto energetico generato dai cicli di manutenzione dovuti alla sostituzione di alcuni componenti dell'involucro, soggetti a una durata definita nel tempo: quindi si è computata l'energia incorporata nei materiali oggetto di sostituzione nell'arco della vita degli edifici. Questa fase dell'analisi energetica del ciclo di vita dei sei casi di studio ha come unità funzionale l'area di 1m<sup>2</sup> di superficie utile dell'edificio unifamiliare e come confine del sistema un arco di vita di 60 anni, dalla fase di produzione dei componenti dell'involucro, alla fase di gestione e manutenzione; la fase di fine vita è esclusa. Gli intervalli di manutenzione sono stati assegnati a ogni componente dei sei tipi di involucro edilizio sulla base dei dati ricavati da assunzioni teoriche e raccolti dalle banche dati disponibili relative alle durate dei materiali e componenti e ai cicli di intervento manutentivo consigliati:

- la banca dati inglese HAPC (HAPM (*Housing Association Property Mutual*), *Component Life Manual* (4° edizione), E & F.N. Spon, London, 1996;
- la banca dati americana Dell'Isola (Dall'Isola A.J., Kirk S.J., *Life cycle cost data*, McGraw-Hill, New York, 1982-83 (con aggiornamento al 1995);



- la banca dati ASTM (*American Society for Testing and Materials*), *Building Maintenance, Repair and Replacement Database for Life Cycle Cost Analysis* (1985 e aggiornamenti al 1995);
- la banca dati francese INIES - *Base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction*, <http://www.inies.fr>;
- la banca dati svizzera HEV - Associazione Svizzera Inquilini (MV) e dall'Associazione dei Proprietari Immobiliari (HEV Schweiz) (2005), Tabella della durata di vita, SMV, Massagno, Svizzera;
- la banca dati riportata nel testo del BRE (*British Research Establishment*), *Green Guide* (2009), BRE, London;
- la banca dati americana BOMA (*Building Owners and Manager Association*) (1992), *Preventive maintenance guide*, BOMA International, New York (allegati alla pubblicazione Boma, *How to Design & Manage Your Preventive Maintenance Program*, Boma International, New York, 1996);
- le indicazioni riportate nel testo francese di J. Perret, Guida alla manutenzione degli edifici: 308 schede tecniche su frequenze e modalità di intervento, edizione italiana a cura di C. Talamo, Maggioli, 2001, Rimini;
- le indicazioni riportate nel testo francese di J. Albano, La manutenzione degli edifici: 250 schede pratiche, edizione italiana a cura di C. Talamo, Esselibri-Simone, 2008, Napoli;
- le indicazioni riportate nel testo di K. Adalberth, "Energy use during the Life Cycle of Buildings: a Method", *Building and Environment*, vol.32, 1997, n. 4, pp. 317-320;
- le indicazioni riportate nel testo italiano di B. Daniotti (a cura di), La valutazione della durabilità di pareti perimetrali verticali non portanti, ediTecnica, 2006, Palermo.

Sono stati ipotizzati due principali tipi di intervento di manutenzione: manutenzione ordinaria della facciata e sostituzione dei componenti guasti o degradati. La sostituzione è stata prevista con le seguenti cadenze:

- ogni 15 anni rifacimento dell'intonaco interno per tutte le sei soluzioni d'involucro,
- ogni 15 anni sostituzione del cappotto esterno nell'involucro A,
- ogni 40 anni sostituzione degli intonaci esterni nell'involucro B (in questo caso l'isolamento non viene sostituito durante la vita utile, poiché posto tra due paramenti murari),
- nessun altro ricambio per l'involucro C,
- ogni 40 anni sostituzione delle tavole di laterizio, dello strato di isolamento, dei dispositivi di sospensione e fissaggio meccanico nell'involucro D,
- ogni 40 anni sostituzione dell'intonaco esterno nell'involucro E,
- l'involucro F vede la sostituzione dei pannelli esterni in alluminio composito ogni 15 anni, del cartongesso ogni 30 anni e la sostituzione completa ogni 40 anni.

Nei calcoli successivi delle energie incorporate nei materiali e componenti per le sostituzioni è stata omessa l'incidenza dei cicli di manutenzione della pittura murale interna e esterna, poiché le quantità di materiale coinvolto sono risultate minime, quindi trascurabili nel bilancio delle energie incorporate nel ciclo di vita degli edifici.

I dati per l'energia incorporata dei nuovi materiali sono estratti sempre da ICE.

## 4.6. I risultati

### 4.6.1. La fase pre-costruzione e l'energia incorporata nell'involucro

Dai risultati emerge come la tipologia B – Muratura a doppio strato con intercapedine isolata presenti il minor contenuto energetico tra le soluzioni a confronto, mentre la tipologia “leggera” F – Sistema costruttivo a secco richieda per la sua produzione una quantità maggiore rispetto a tutte le altre e quasi il doppio della tipologia B. Tra le soluzioni tecniche in laterizio (A-B-C-D-E), a parità di trasmittanza termica, per  $m^2$  di involucro, si evince che la tipologia B a doppio strato con isolante in intercapedine ha minor energia incorporata, seguita dalle tipologie E monostrato intonacato e A monostrato con rivestimento a cappotto, mentre la tipologia C monostrato con rivestimento in tavelle e intercapedine ventilata e la D doppio strato con intercapedine isolata e mattoni estrusi faccia a vista hanno una energia incorporata elevata rispetto alle altre.

La soluzione B – Muratura a doppio strato con intercapedine isolata è la più leggera tra le soluzioni “massive”, poiché i laterizi dei due paramenti murari sono con densità minore rispetto agli altri blocchi utilizzati, nonostante assicurino la stessa prestazione. In questa tipologia i blocchi hanno spessore inferiore, ma dimensioni (altezza e larghezza) superiori agli altri blocchi, per cui l'incidenza dei giunti in malta, di cui è stato conteggiato il contributo in termini di energia incorporata, è inferiore rispetto a quello delle altre tipologie. Si nota infatti come tale contributo della malta sia notevole per il paramento murario esterno in laterizi faccia a vista della tipologia C: i mattoni faccia a vista sono di piccole dimensioni e quindi i corsi di malta in orizzontale e verticale sono molti (incidono per circa il 22% su un  $m^2$ ). La tipologia C, proprio per il peso dei mattoni faccia a vista, presenta il più alto valore di massa superficiale ( $349,12 \text{ kg}/m^2$ ), seguita dalla tipologia E a monostrato intonacata ( $341,5 \text{ kg}/m^2$ ). Quest'ultima non è isolata e per rispondere al requisito della trasmittanza pari a  $0,33 \text{ W}/m^2K$  necessita di blocchi con notevole spessore (il maggiore rispetto alle altre) e quindi con maggior quantità di materiale.

Se si confrontano parzialmente le tipologie A e D, con una soluzione a monostrato isolata, in cui cambia soltanto il sistema tecnico di rivestimento esterno, emerge come la massa superficiale sia simile. Nella tipologia D lo spessore totale aumenta in relazione al tipo di rivestimento, mentre diminuisce lo spessore di isolante, i blocchi di laterizio hanno geometria diversa (quindi diverse quantità di giunti in malta), ma spessore uguale. Ciò nonostante la tipologia D ha maggior energia incorporata, dovuta da un lato a un maggior peso del blocco ( $\rho = 900 \text{ kg}/m^3$ ) rispetto a quello della tipologia A ( $\rho = 790 \text{ kg}/m^3$ ), dall'altro alla presenza di un rivestimento in tavelle, con il contributo dei profili a C in acciaio per reggerle, più pesante dell'intonaco per cappotti. In un'ottica di analisi del ciclo di vita, la soluzione a cappotto, penalizzata in termini di maggior energia rispetto all'altra, offre il grande vantaggio della reversibilità nel tempo del rivestimento esterno, per cui tramite operazioni rapide di disassemblaggio è possibile prevedere una più agevole sostituzione dell'isolante nei cicli di manutenzione della fase d'uso.

Complessivamente le tipologie A-B-C-D-E sono soluzioni particolarmente performanti in termini di inerzia termica, con ottimi valori di sfasamento e attenuazione dell'onda termica. Da questo punto di vista la tipologia F, costituita da tamponamento leggero, è di nuovo la meno performante.

Va ammesso che considerare una sola prestazione è limitativo, poiché, considerando fin dall'inizio altri parametri per definire l'unità funzionale, lo scenario muterebbe. Ad esempio tra le diverse alternative tecnico-costruttive cambia la modalità di messa in opera, considerando non solo il prodotto o il singolo componente, ma il sub-sistema edilizio. Comparando la tipologia F di tipo leggero con le altre, a parità di trasmittanza termica, l'assemblaggio a secco velocizza i tempi di posa in opera e, successivamente, di dismissione, rispetto alla cantierizzazione a umido delle soluzioni più tradizionali in laterizio; tuttavia come già premesso la leggerezza del sistema è penalizzante nella fase di gestione del comfort e del risparmio energetico, nell'arco dell'anno, maggiormente garantiti dall'inerzia termica di soluzioni massive.

Inoltre, sempre in un confronto tra "leggero" e "massivo", considerando lo spessore della chiusura verticale esterna opaca F, bisogna considerare come tale soluzione messa in opera in un edificio consenta di "occupare meno superficie utile", tenendo come filo fisso il perimetro esterno del volume dell'edificio, rispetto a un muro in laterizio, sempre a parità di prestazione termica. Infatti, se ai parametri per definire l'unità funzionale, si aggiungesse la regola economica del massimo profitto e si effettuasse una analisi del valore della superficie commerciale, la soluzione leggera potrebbe essere premiante, poiché la superficie utile interna all'edificio è maggiore rispetto allo stesso con chiusura verticale massiva. Tuttavia a tale vantaggio, corrispondono più svantaggi: da un lato l'adozione di questa tipologia d'involucro può generare disagi per la vivibilità, in termini di sicurezza contro le intrusioni, e per il comfort interno, in termini di benessere climatico dei locali in alcuni periodi dell'anno, dall'altro offre un livello di "arredabilità" e "attrezzabilità" molto inferiore se paragonata a soluzioni massive. Infatti, in merito alle soluzioni massive è possibile intervenire in momenti

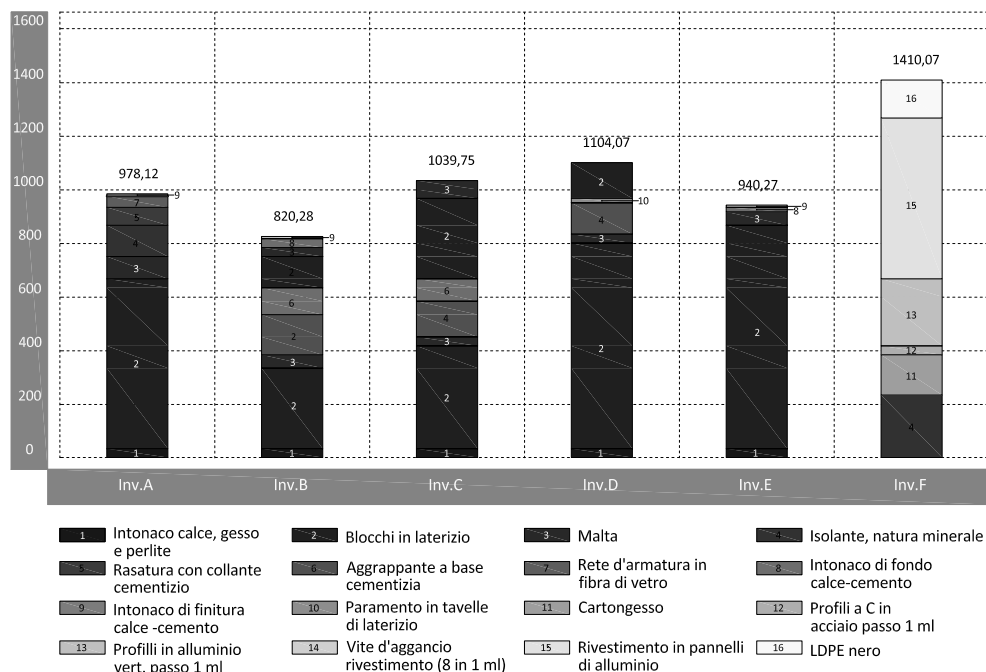


Fig. 4-6: Risultati dell'analisi dell'energia incorporata delle sei tipologie d'involucro.

successivi alla progettazione e messa in opera, per installare sui muri elementi d'arredo o attrezzature, nel caso delle chiusure opache leggere è indispensabile prevedere tutto in fase di progettazione, prevedendo i rinforzi e i supporti necessari per l'arredabilità delle chiusure perimetrali esterne opache.

Queste valutazioni vanno messe in relazione non solo tra loro, ma anche e soprattutto con i risultati emergenti dalla valutazione dei consumi energetici durante la fase d'uso dell'edificio, come sopra (ovviamente prendendo come riferimento l'energia incorporata nell'intero perimetro delle chiusure verticali opache, insieme alle energie incorporate degli altri subsistemi d'involucro dell'edificio).

#### **4.6.2. La fase pre-costruzione e l'energia incorporata negli edifici**

Considerando i risultati di energia incorporata totale nei due gruppi di edifici, le differenze emergenti sono da attribuirsi ai valori iniziali di energia incorporata nei diversi tipi di involucro, poiché i valori degli altri subsistemi sono costanti. La grande differenza tra i risultati di energia incorporata nelle due tipologie di edifici (normalizzati su un  $m^2$  di superficie utile  $S_u$  climatizzata) è dovuto al fattore di forma  $S/V$ : l'edificio a torre ha una forma più compatta della casa unifamiliare, per cui la sua energia incorporata per un  $m^2$  di superficie utile è inferiore a quella della seconda. La differenza tra i valori di energia incorporata dei diversi casi di edificio unifamiliare è determinata dal diverso valore delle energie incorporate delle chiusure perimetrali verticali esterne, per cui nuovamente l'edificio unifamiliare con la tipologia d'involucro leggera è quello a maggior contenuto energetico, mentre quello con la tipologia a doppia parete con intercapedine isolata quello con il minore valore di energia incorporata. I valori di EE degli altri subsistemi, infatti, sono costanti.

Per i sei casi unifamiliari, circa il 50% dell'impatto energetico per la costruzione dell'edificio e dei suoi componenti è generato dal solaio controterra, a causa del peso dei materiali che lo compongono e in conseguenza alla normalizzazione del valore totale rispetto alla superficie utile, con riferimento al rapporto  $S/V$ : infatti la superficie del solaio controterra, come quella del solaio di copertura, ha un valore di poco superiore rispetto alla superficie utile, quale fattore di normalizzazione. Cosa differente accade per l'involucro, le cui superfici differiscono maggiormente e, quindi, dalla normalizzazione si ottiene un valore maggiore rispetto al quello unitario di energia incorporata della chiusura verticale opaca.

Sul valore di energia totale, nello specifico di questi casi studio, ha un suo peso anche l'energia incorporata delle coperture, mentre poco incidente è l'incidenza delle chiusure verticali opache, che sono comunque di dimensioni limitate rispetto a tutto l'involucro.

Nel valore totale di energia incorporata dei sei casi in analisi non è contemplata la quota relativa al subsistema delle strutture: in alcuni casi, quali 1A, 1C, 1D e 1E, potremmo pensare che la muratura sia portante, date le dimensioni dei blocchi che costituiscono l'involucro (quindi non ci sarebbero elementi aggiuntivi, di cui pesare l'energia incorporata), mentre nei casi 1B e 1E è necessaria la struttura. Quindi se in questi casi si considerasse anche tale subsistema, i valori totali di energia incorporata sarebbero maggiori in entrambi i risultati. Ciò significa che il suo valore di EE del caso 1F, già superiore agli altri, aumenterebbe e che la tipologia 1B, probabilmente, non risulterebbe più quella con il minor impatto energetico per al fase di costruzione. Queste considerazioni esulano dalla ricerca, ma fanno comprendere come sia importante e necessario esplicitare i limiti del sistema e gli elementi in gioco, in conseguenza ai quali possono mutare i risultati delle analisi.

Cod Analisi	Tipologia di involucro	EE parete	EE tot. involucro vert. edificio	EE tot. involucro vert. Edificio/ m <sup>2</sup>
U.d.M.		MJ/m <sup>2</sup>	MJ/edificio	MJ/m <sup>2</sup> Su
1A	Muratura monostrato con isolamento esterno	978,12	156.988,10	1.191,02
1B	Muratura a doppio strato con intercapedine isolata	820,28	131.655,26	1.007,39
1C	Muratura a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni estrusi faccia a vista	1.039,75	166.879,88	1.263,76
1D	Muratura a doppio strato con intercapedine - facciata ventilata	1.104,07	177.203,46	1.373,67
1E	Muratura monostrato intonacata	940,27	150.913,98	1.152,28
1F	Involucro con sistema costruttivo a "secco"	1.410,07	226.316,99	1.598,96
Cod Analisi	Subsistema	EE subsistema	EE tot. subsistemi	EE tot. subsistemi edificio/ m <sup>2</sup>
U.d.M.		MJ/m <sup>2</sup>	MJ/edificio	MJ/m <sup>2</sup> Su
copertura	Solaio in laterocemento isolato con strato di ghiaia di finitura	2.441,05	366.157,50	2.757,21
solaio c.t.	Solaio controterra isolato	3.491,47	523.719,90	3.943,67
serramenti	Legno e alluminio	1350,05*	13.500,50	101,66

Tab. 4-20: Risultati dal modello di calcolo con i valori di energia incorporata per i subsistemi dell'edificio unifamiliare monopiano

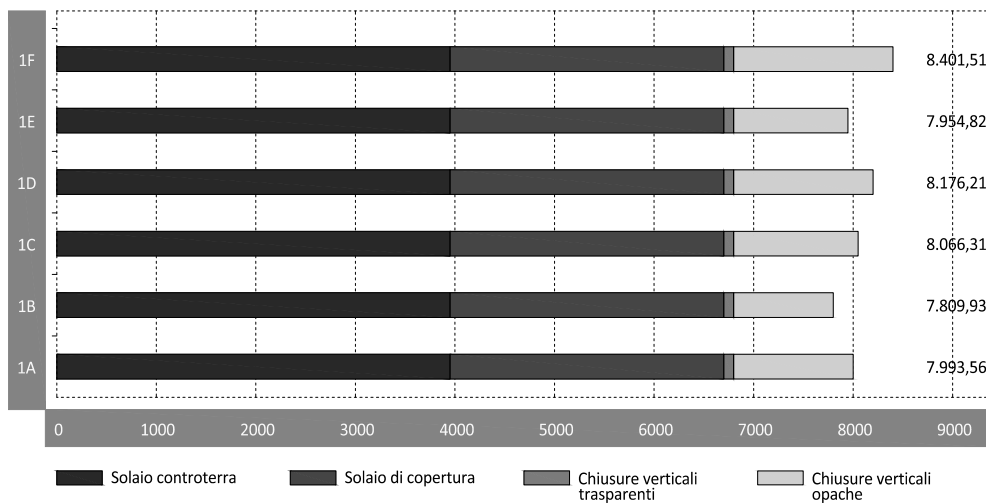


Fig. 4-7: Confronto fra le energie incorporate dei sei edifici unifamiliari monopiano, normalizzate sulla superficie utile

La differenza tra i valori di energia incorporata dei diversi casi di edificio a torre, come nei casi monopiano unifamiliari, è determinata dal diverso valore di partenza delle energie incorporate delle chiusure perimetrali verticali esterne, quindi nuovamente l'edificio a torre con la tipologia d'involucro leggera è quello a maggior contenuto energetico, mentre quello con la tipologia a doppia parete con intercapedine isolata quello con il minore valore di energia incorporata. I valori di EE degli altri subsistemi, infatti, sono costanti.

Nei casi dell'edificio a torre pluripiano, se considerassimo gli stessi subsistemi coinvolti nelle tipologie monopiano unifamiliari, circa il 50% dell'impatto energetico di costruzione è determinato dal subsistema delle chiusure verticali opache, mentre l'incidenza del valore di EE del solaio è di circa la metà del precedente. Valori più bassi hanno il solaio di copertura, dopo quello controterra, e il subsistema delle chiusure verticali trasparenti. Questa inversione rispetto alle casistiche precedenti è influenzata in modo evidente dal fattore di forma degli edifici a torre (rapporto S/V): in questo caso, in la normalizzazione del valore totale rispetto alla superficie utile da risultati ben diversi. Infatti, data la compattezza della tipologia edilizia, il solaio controterra e il solaio di copertura presentano una superficie notevolmente inferiore rispetto alla superficie utile totale dell'edificio di sedici piani. La superficie di involucro è molto estesa rispetto alle due precedenti, tuttavia il valore corrisponde a meno della metà della superficie utile. Quindi anche in questo caso le incidenze sui risultati delle EE dei subsistemi e il loro confronto sono direttamente in relazione al fattore di normalizzazione, la  $S_u$ .

Complessivamente i valori relativi all'energia incorporata dell'involucro delle sei tipologie a torre, normalizzati alla superficie utile, sono piccoli se paragonati alla tipologia unifamiliare. In tal modo è indispensabile evidenziare come la visione dell'impatto energetico sia parziale, poiché in un edificio a torre la quota di EE relativa al subsistema delle strutture ha un'enorme incidenza sui risultati, ma per coerenza e omogeneità del confronto con le altre tipologie monopiano, questa non è stata considerata. Tuttavia, limitatamente a questa fase dell'analisi, si è computata l'energia incorporata delle chiusure orizzontali interpiano, che nella struttura monopiano unifamiliare non esistono: il valore, normalizzato sulla superficie utile, determina un'incidenza sui risultati davvero notevole: fa triplicare il valore di energia incorporata totale. In questa soluzione tipologica il loro peso e la somma delle loro superfici ( $S_{\text{tot solai interpiano}} = 6450 \text{ m}^2 \text{ ca.}$ ) sono consistenti.

Cod Analisi	Tipologia di involucro	EE parete	EE tot. involucro vert. edificio	EE tot. involucro vert. Edificio/ $\text{m}^2$
U.d.M.		MJ/m <sup>2</sup>	MJ/edificio	MJ/m <sup>2</sup> Su
2A	Muratura monostrato con isolamento esterno	978,12	3.195.084,40	533,85
2B	Muratura a doppio strato con intercapedine isolata	820,28	2.679.500,37	447,17
2C	Muratura a doppio strato con intercapedine isolata e mattoni estrusi faccia a vista	1039,75	3.396.405,76	570,74
2D	Muratura a doppio strato con intercapedine - facciata ventilata	1.104,07	3.606.515,41	611,34
2E	Muratura monostrato intonacata	940,27	3.071.461,44	515,40
2F	Involucro con sistema costruttivo a "secco"	1.410,07	4.606.093,61	733,75
Cod Analisi	Subsistema	EE subsistema	EE tot. involucro vert. edificio	EE tot. involucro vert. Edificio/ $\text{m}^2$
U.d.M.		MJ/m <sup>2</sup>	MJ/edificio	MJ/m <sup>2</sup> Su
copertura	Solaio in laterocemento isolato con strato di ghiaia di finitura	2441,05	1.291.315,45	214,83
solai interpiano	Solaio interpiano in laterocemento isolato	2066,77	13.330.666,50	2.217,80
solaio c.t.	Solaio controterra isolato	3.491,47	1.846.985,51	307,28
serramenti	Legno e alluminio	1350,05*	864.032,00	143,75

\* valore unitario per serramento di dim. 115x163 cm

Tab. 4-21: Risultati dal modello di calcolo con i valori di energia incorporata per i subsistemi dell'edificio a torre pluripiano

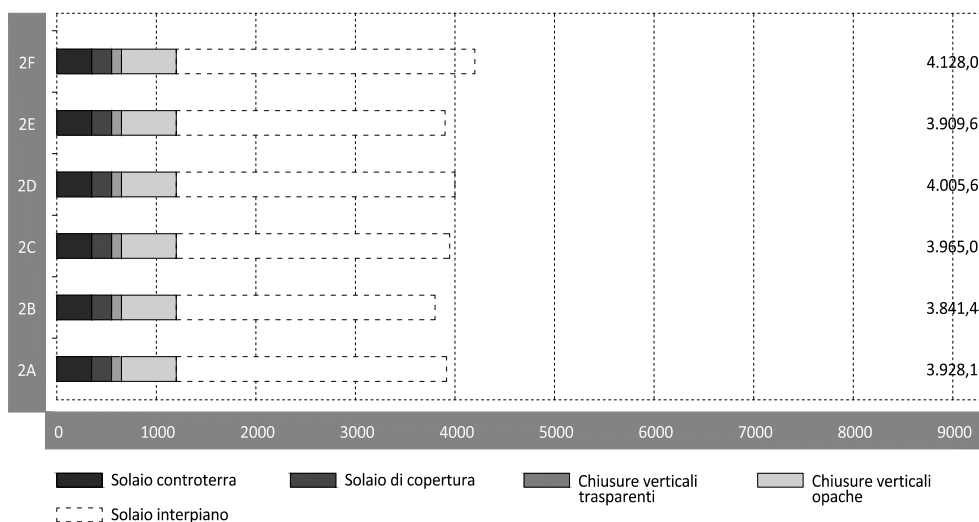


Fig. 4-8: Confronto fra le energie incorporate dei sei edifici a torre, normalizzate sulla superficie utile

#### 4.6.3. La fase d'uso e i consumi energetici

La quantità totale di energia primaria FEP per riscaldamento e raffrescamento delle sei case unifamiliari durante l'anno varia tra 103 e 113 kWh/m<sup>2</sup>a, quella delle torri è tra 69 e 78 kWh/m<sup>2</sup>a. Le differenze dei risultati di FEP tra le torri e le case unifamiliari sono anche in questo caso imputabili al fattore di forma. Nonostante le stesse soluzioni di involucro, il basso rapporto S/V delle torri implica avere dispersioni termiche ridotte. In entrambi i gruppi di edifici le notevoli differenze nelle dispersioni termiche per conduzione sono inoltre influenzate dai ponti termici che, in conformità alla norma UNI EN ISO 14683:2008, dipendono dal tipo di involucro dell'edificio. In percentuale l'incidenza dei ponti termici sulle dispersioni termiche per i diversi tipi d'involucro varia tra 8 a 27%.

In entrambi i gruppi di edifici, anche se la dimensione esterna e il volume sono costanti, la superficie climatizzata cambia dal tipo A all'F, in conseguenza alla messa in opera dei tipi involucro a spessore differente. Nella figura 4-9 si evince la quantità di energia coinvolta nella fase pre-operativa e quella del fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento.

I risultati ottenuti dimostrano come i casi studio analizzati rientrino nei valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale o il riscaldamento, nel corso di un anno (kWh/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub>), rispettando i limiti imposti a livello nazionale e regionale (Decreto della Regione Lombardia n. 5018 del 11.06.2007 e s.m.i.): infatti per il rapporto di forma dell'edificio unifamiliare monopiano in analisi pari a 0,91, il valore massimo previsto nell'allegato A in tabella A.1.1 del Decreto n. 5796, per edifici nella zona climatica E, è tra 88 kWh/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub> a 2101 GG e 116 kWh/m<sup>2</sup> S<sub>u</sub> a 3000 GG. Quindi i casi studio rispettano i limiti.

Rispetto ai valori di EP<sub>H</sub> per il riscaldamento ottenuti, i casi di studio 1A, 1D, 1E e 1F rientrano nella Classe energetica C, mentre i casi di studio 1B e 1C ricadono nella classe energetica D. Questi esiti sono la dimostrazione dell'incidenza sui risultati energetici della

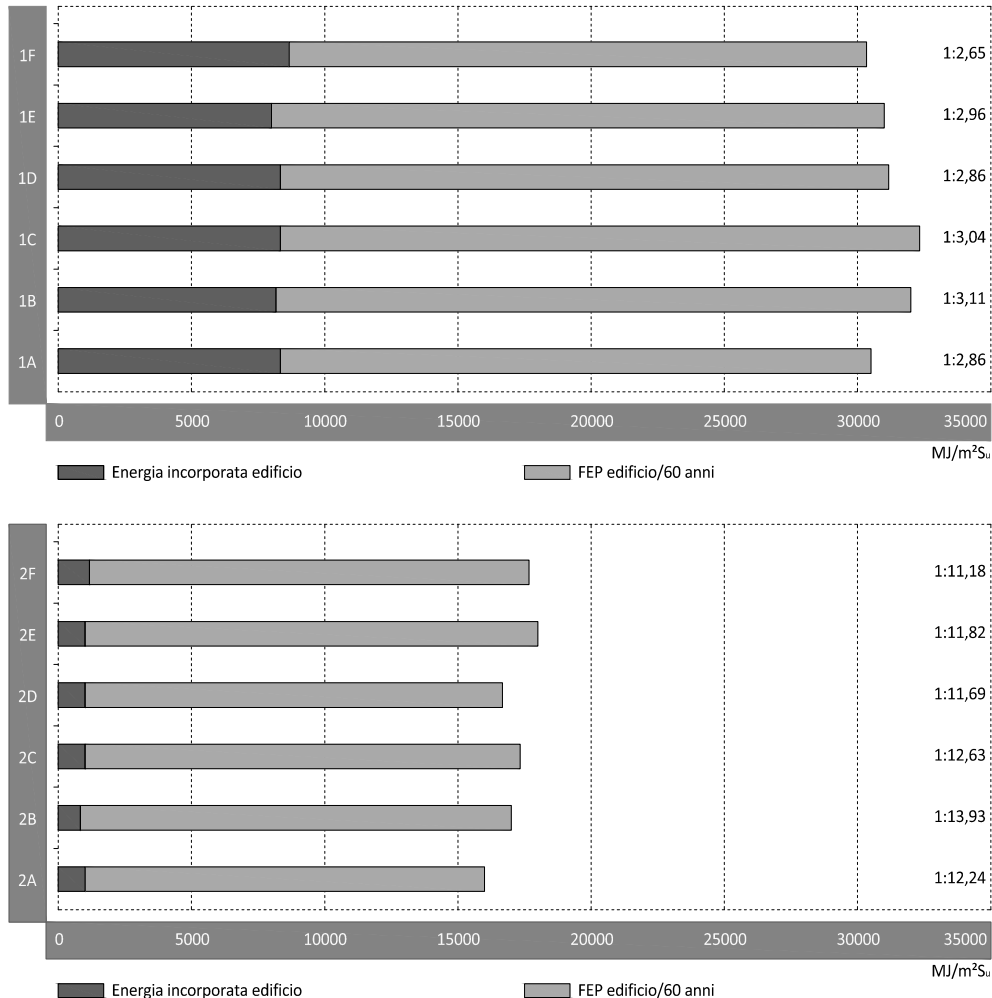


Fig. 4-9: Casi di studio: confronto e rapporto (per es. 1:2,86 per la 1A) tra i valori di energia incorporata EE e di fabbisogno di energia primaria FEP in 60 anni, normalizzati sulla superficie utile (sopra - caso dell'edificio unifamiliare, sotto - caso dell'edificio a torre)

scelta progettuale della configurazione dell'involucro, nonostante i valori di trasmittanza termica di partenza fossero gli stessi per i sei tipi di involucro di facciata. L'incidenza sui diversi risultati di FEP è dovuta proprio alle diverse configurazioni: in funzione della tecnologia costruttiva, ognuna caratterizzata da spessore differente, cambiano la superficie utile, i ponti termici e la capacità interna.

Relativamente ai valori ottenuti di  $ET_c$  per il raffrescamento, le sei variabili dell'edificio 1 rientrano nella Classe energetica C.

Confrontando i risultati per le sei tipologie, l'edificio 1F presenta il valore più basso di fabbisogno energetico primario per la climatizzazione annuale dell'edificio, motivato dalla configurazione stratigrafica dell'involucro, con lo spessore di materiale isolante maggiore



rispetto agli altri. Nell'impostazione del modello di calcolo del fabbisogno energetico primario, viene attribuito un valore di capacità termica volumica ad ogni tipo di struttura (edifici con muri in pietra o assimilabili, edifici con muri in mattoni pieni o assimilabili, edifici con muri in mattoni forati o assimilabili, edifici con pareti leggere o isolati dall'interno) per la determinazione della costante di tempo, necessaria per il calcolo del fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti per il riscaldamento e raffrescamento. Questo aspetto è uno dei fattori che determina la differenza nei risultati del fabbisogno energetico netto per le sei tipologie, nonostante la stessa trasmittanza termica di partenza ( $U = 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Altro fattore incidente nella differenza dei risultati del consumo energetico per la climatizzazione è la diversa superficie utile dei casi di studio (di conseguenza il diverso volume netto riscaldato), dovuto allo spessore differente delle sei soluzioni di facciata; si tiene conto di questo aspetto nel calcolo degli apporti interni e solari: come specificato in precedenza, i sei tipi di involucro hanno spessori totali differenti e vengono messi in opera nell'edificio 1 sul filo esterno del perimetro, di conseguenza la superficie utile interna tra le sei soluzioni è maggiore nel caso dell'uso della tipologia 1F (la meno spessa) e minore nel caso della tipologia 1D (con lo spessore di parete più elevato).

I valori relativi alle dispersioni per ventilazione sono uguali per i sei casi di studio, poiché sia le dimensioni e la tipologia delle chiusure verticali trasparenti sia i volumi di ricambio d'aria sono costanti ( $0,3 \text{ vol/h}$ ).

Anche i casi di studio applicati alla tipologia edilizia a torre rientrano nei valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale o il riscaldamento, nel corso di un anno ( $\text{kWh/m}^2 S_{u,i}$ ), rispettando i limiti imposti a livello nazionale e regionale (Decreto della Regione Lombardia n. 5018 del 11.06.2007 e s.m.i.): infatti il rapporto di forma dell'edificio a torre pluripiano in analisi è  $S/V = 0,22$ , e il valore massimo previsto nell'allegato A in tabella A.1.1 del Decreto n. 5796, per edifici con tale fattore e nella la zona climatica E, è di circa  $37,4 \text{ kWh/m}^2 S_{u,i}$  a 2101 GG e  $51,48 \text{ kWh/m}^2 S_{u,i}$  a 3000 GG. Quindi i casi studio rispettano i limiti, con fabbisogni energetici invernali inferiori al limite della norma (i valori dei casi di studio vanno da uno minimo di  $26 \text{ kWh/m}^2 S_{u,i}$  per il caso 2A a un massimo di  $36 \text{ kWh/m}^2 S_{u,i}$  per il caso 2E. Rispetto ai valori di  $EP_H$  per il riscaldamento ottenuti, gli edifici a torre con le tipologie di involucro B, C, E, F rientra nella Classe energetica B, lo stesso con le tipologie A e D passa alla classe energetica A (fig. 4-9). Relativamente ai valori di  $ET_c$  per il raffrescamento ottenuti, gli edifici a torre con le tipologie di involucro E, F rientrano nella Classe energetica D e quelli con le tipologie A, B, C, D rientrano nella Classe energetica E (fig. 4-9). Anche in questo caso il valore di fabbisogno energetico netto non è il risultato della somma algebrica delle dispersioni e degli apporti indicati sopra di esso, ma l'esito del bilancio dei risultati mensili di fabbisogno netto.

Confrontando i risultati del fabbisogno energetico primario per la climatizzazione annuale di sei casi di studio a torre, l'edificio 2A presenta il minor consumo, dovuto alla tipologia di soluzione di facciata, che riduce i ponti termici e di conseguenza le dispersioni tramite questi. Come già precedentemente espresso, le diverse configurazioni incidono sui diversi risultati di FEP, dovuti proprio alla tecnologia costruttiva, ognuna caratterizzata da spessore differente, quindi alla superficie utile, ai ponti termici e alla capacità interna. Nei casi con la tipologia a torre, rispetto a quelli con la tipologia unifamiliare, i ponti termici (diversi a seconda del tipo di stratificazione di involucro applicata) sono molto influenti sulle dispersioni termiche: sono inevitabilmente molti.

Anche per questo gruppo di casi di studio, l'attribuzione del valore di capacità termica volumica ad ogni tipo di struttura (edifici con muri in pietra o assimilabili, edifici con muri in mattoni pieni o assimilabili, edifici con muri in mattoni forati o assimilabili, edifici con pareti leggere o isolati dall'interno), per la determinazione della costante di tempo, necessaria per il calcolo del fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti per il riscaldamento e raffrescamento, è uno dei fattori determinanti della differenza dei risultati del fabbisogno energetico netto, nonostante la stessa trasmittanza termica di partenza ( $U=0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Altro fattore incidente nella differenza dei risultati del consumo energetico per la climatizzazione è la diversa superficie utile dei casi di studio (di conseguenza il diverso volume netto riscaldato), dovuto allo spessore differente delle sei soluzioni di facciata; si tiene conto di questo aspetto nel calcolo degli apporti interni e solari: come specificato in precedenza, i sei tipi di involucro hanno spessori totali differenti e vengono messi in opera nell'edificio 2 sul filo esterno del perimetro, di conseguenza la superficie utile interna tra le sei soluzioni è maggiore nel caso dell'uso della tipologia 2F (la meno spessa) e minore nel caso della tipologia 2D (con lo spessore di parete più elevato).

I valori relativi alle dispersioni per ventilazione sono uguali anche per i sei casi di studio a torre, poiché, sia le dimensioni e la tipologia delle chiusure verticali trasparenti sia i volumi di ricambio d'aria sono costanti ( $0,3 \text{ vol/h}$ ).

In conclusione, riassumendo, le differenze dei risultati del fabbisogno energetico tra gli edifici a torre e gli edifici unifamiliari sono dovute principalmente al fattore di forma. Durante la stagione invernale gli edifici unifamiliari richiedono maggiori quantità di energia a  $\text{m}^2$  di superficie utile rispetto agli edifici a torre proprio per il fattore di minor compattezza della forma. All'opposto durante la stagione estiva il fabbisogno energetico degli edifici a torre è maggiore di quello degli edifici unifamiliari, proprio per il fattore di forma più piccolo.

La stessa soluzione tecnica di involucro verticale, ma con un rapporto  $S/V$  inferiore, determina una riduzione delle dispersioni termiche direttamente proporzionale al fattore di forma. In entrambi i gruppi di casi studio le dispersioni termiche per trasmissione sono influenzate dai ponti termici, la cui entità dipende dalla tipologia di involucro verticale.

Ogni caso di studio ha la stessa ventilazione, in numero di ricambi d'aria/h, ma l'influenza della ventilazione sulle dispersioni termiche è maggiore negli edifici a torre, che in quelli unifamiliari.

Dopo il calcolo delle energie incorporate nell'edificio monopiano e nell'edificio a torre e il calcolo dei rispettivi fabbisogni energetici primari si traggono dal confronto alcune considerazioni. Emerge complessivamente che il fattore di forma è determinante rispetto ai risultati ottenuti:

- l'energia incorporata totale per la costruzione dell'involucro dell'*edificio unifamiliare* ( $S/V = 0,90$ ) (pareti perimetrali esterne, opache e trasparenti, copertura e solaio contro terra), normalizzata rispetto al valore di superficie utile, ha un valore maggiore rispetto a quella per la costruzione dell'involucro dell'*edificio a torre* ( $S/V = 0,375$ ): infatti i casi a torre hanno una forma edilizia più compatta, rispetto alla superficie utile, e efficiente dal punto di vista del risparmio energetico; quindi la superficie dell'involucro della torre si rapporta a una dimensione della superficie utile notevole, per cui il valore di energia incorporata totale per la costruzione dell'involucro "si distribuisce" su tale valore; mentre per l'edificio unifamiliare la superficie d'involucro si rapporta a un solo piano, per cui l'energia incorporata per la costruzione dell'involucro "si distribuisce" su una superficie utile più piccola.

In cifre: - il valore di energia incorporata nell'edificio unifamiliare 1A, per un  $\text{m}^2$  di

superficie utile, è di 7993,56 MJ/ m<sup>2</sup>; - il valore di energia incorporata nell'edificio a torre 2A, per un m<sup>2</sup> di superficie utile, è di 1199,71 MJ/m<sup>2</sup>; - anche confrontando i valori dei consumi energetici per la climatizzazione, l'edificio a torre ha un valore di fabbisogno energetico annuo per m<sup>2</sup> di superficie utile molto inferiore al valore equivalente per l'edificio unifamiliare. Di nuovo il valore del FEP complessivo per la climatizzazione dell'edificio pluripiano si distribuisce su una superficie utile grande rispetto allo stesso rapporto visto nel caso dell'edificio monopiano. In cifre: - il valore di energia primaria per la climatizzazione annua dell'edificio unifamiliare 1A, per un m<sup>2</sup> di superficie utile, è di 381,52 MJ/m<sup>2</sup>a; - il valore di energia primaria per la climatizzazione annua dell'edificio a torre 2A, per un m<sup>2</sup> di superficie utile, è di 244,65 MJ/m<sup>2</sup>a. Un'ultima considerazione: ricordando che l'obiettivo del lavoro di ricerca mira la confronto fra le energia di produzione per l'involucro e le energie per contrastare le dispersioni di tale involucro, va sottolineato come la comparazione del valore dell'energia incorporata per la costruzione delle due tipologie sia certamente lecita, ma restituisce una situazione parziale, in particolare nel caso dell'edificio a torre: infatti nei valori riportati in questo paragrafo abbiamo tralasciato l'energia per la costruzione dei solai interpiano (altrimenti il valore di energia incorporata nell'edificio a torre 2A, per un m<sup>2</sup> di superficie utile, da 1199,71 MJ/m<sup>2</sup> passerebbe a 3417,51 MJ/m<sup>2</sup>), che esulano dall'involucro disperdente. Inoltre nel caso dell'edificio a torre, se venisse considerata la struttura, essa farebbe crescere decisamente il valore di energia incorporata dell'edificio. Diversamente nel caso della tipologia monopiano, come è già stato anticipato nei paragrafi precedenti, la struttura potrebbe coincidere per alcuni tipi di stratificazione della parete con la muratura portante dell'involucro.

#### **4.6.4. La fase d'uso e la manutenzione**

Dall'applicazione dell'approccio individuato emerge come i risultati di una valutazione LCA di differenti soluzioni di chiusura verticale esterna basata sulla previsione di una determinata durata dell'edificio possano cambiare in modo significativo in relazione all'incertezza delle variabili considerate (es. la durabilità di componenti e il numero di cicli di manutenzione) e ai confini del sistema considerati: se si considera la sola energia della fase pre-consumo e della fase di gestione della climatizzazione si hanno determinati risultati, che cambiano considerevolmente se i confini del sistema comprendono anche il contributo dei cicli di manutenzione e sostituzione dei componenti. Per esempio, fissando i confini del sistema dalla produzione dei materiali alla fase di gestione (senza la manutenzione e sostituzione dei materiali obsoleti), entrambi gli edifici con l'involucro F presentano il minor consumo energetico per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici rispetto alle altre soluzioni (fig. 4-9). Con il computo delle energie per i cicli di sostituzione, tale soluzione costruttiva si caratterizza invece come la più energivora. poiché devono essere previsti più cicli di manutenzione, con la sostituzione del rivestimento, nei 60 anni di vita considerati.

Un'ulteriore considerazione: per la fase pre-consumo, entrambe le tipologie con l'involucro B risultano le meno energivore rispetto a quelle con gli altri tipi d'involucro, in conseguenza al basso valore di energia incorporata dei materiali coinvolti in tale soluzione tecnica. Se si considera la fase operativa, la casa unifamiliare con la soluzione F consuma meno energia rispetto alle altre, proprio come l'edificio a torre con la soluzione A. Includendo la fase di manutenzione, la casa unifamiliare con la soluzione E ha il consumo di energia totale più basso rispetto alle altre, così come l'edificio a torre con la soluzione A.

Tenendo conto della differenza dei consumi energetici tra il caso più efficiente (in termini di energia) e il meno performante, emerge come la scelta del tipo di involucro influisca sui risultati e sul consumo di energia. Per esempio, nella casa unifamiliare la scelta della soluzione E determina un consumo di energia di 31.600,95 MJ/m<sup>2</sup> in 60 anni pari a 146 kWh/m<sup>2</sup>a. Nel stesso tipo di edificio la soluzione F genera un consumo di 33.816,62 MJ/m<sup>2</sup> in 60 anni, pari a 156,5 kWh/m<sup>2</sup>a. La differenza di 10,5 kWh/m<sup>2</sup>a è paragonabile al fabbisogno energetico primario per il riscaldamento di un nuovo edificio di classe A a Milano.

FASI DEL CICLO DI VITA	U.d.M.	1A	1B	1C	1D	1E	1F
EE	MJ/m <sup>2</sup> Su	7,993.56	7,809.93	8,066.31	8,176.21	7,954.82	8,401.51
FEP	MJ/m <sup>2</sup> Su	22,891.13	24,327.25	24,499.02	23,347.74	23,513.19	22,298.62
EE manutenzione	MJ/m <sup>2</sup> Su	871.99	133.54	103.03	406.05	132.93	3,116.50
EE	%	25.17	24.20	24.69	25.61	25.17	24.84
FEP	%	72.08	75.38	74.99	73.12	74.41	65.94
EE manutenzione	%	2.75	0.41	0.32	1.27	0.42	9.22

Tab. 4-22: Risultati della valutazione energetica del ciclo di vita delle case unifamiliari con sei diverse soluzioni d'involucro per una vita utile di 60 anni

FASI DEL CICLO DI VITA	U.d.M.	2A	2B	2C	2D	2E	2F
EE	MJ/m <sup>2</sup> Su	1,199.71	1,113.03	1,236.60	1,277.20	1,181.26	1,399.62
FEP	MJ/m <sup>2</sup> Su	14,678.81	15,503.04	15,612.86	15,051.72	16,321.02	15,650.88
EE manutenzione	MJ/m <sup>2</sup> Su	360.70	54.59	43.10	164.14	54.81	1,333.06
EE	%	7.39	6.68	7.32	7.74	6.73	7.61
FEP	%	90.39	93.00	92.42	91.26	92.96	85.14
EE manutenzione	%	2.22	0.33	0.26	1.00	0.31	7.25

Tab. 4-23: Risultati della valutazione energetica del ciclo di vita degli edifici a torre con sei diverse soluzioni d'involucro per una vita utile di 60 anni

La valutazione ambientale del ciclo di vita si basa sul flusso dei materiali necessari ad assolvere la prestazione richiesta, per cui la densità dei materiali utilizzati diviene una variabile particolarmente critica: in generale è possibile affermare che un componente pesante presenta impatti ambientali superiori rispetto a un componente leggero. Per esempio il laterizio ha una densità molto superiore ai materiali isolanti e nella valutazione ambientale esso risulta penalizzato nonostante la sua produzione coinvolga per esempio una minor quantità di energia rispetto all'isolante in fibra minerale.

Nell'involucro F l'elevato valore dell'energia incorporata è imputabile al sandwich di rivestimento esterno (due lamiere di alluminio primario e un nucleo in LDPE nero): ipotizzando l'impiego di un alluminio riciclato, il risultato cambierebbe. Tuttavia, con riferimento alla banca dati della durata, non cambierebbero gli anni di riferimento per i cicli di sostituzione, più frequenti degli altri. Altro aspetto che deve essere considerato è la complessità della soluzione costruttiva. Soluzioni particolarmente articolate sono caratterizzate da un impatto più elevato nel ciclo di vita qualora non sia ipotizzabile una identica durata per tutti i componenti utilizzati: intervenire per la sostituzione di un componente usurato caratterizzato da una vita breve in molti casi impone anche l'intervento di sostituzione di componenti che invece avrebbero una vita molto più lunga.

In tal senso, la tipologia E, con la sua semplice conformazione, può essere considerata la più affidabile rispetto ai cicli di manutenzione, anche se presenta evidenti limitazioni rispetto alle soluzioni alternative da altri punti di vista (spessore elevato, energia incorporata maggiore a altre soluzioni tecniche in laterizio dovuta alla maggior massa superficiale, irreversibilità). Occorre infine osservare come le durate dei componenti e le frequenze degli interventi di manutenzione e sostituzione considerate in questo studio, presentino nel caso del ciclo di vita di 60 anni un'incidenza molto bassa sui consumi energetici attribuibili alla fase di sostituzione programmata di componenti dell'involucro rispetto ai consumi di energia primaria imputabili alla fase d'uso.

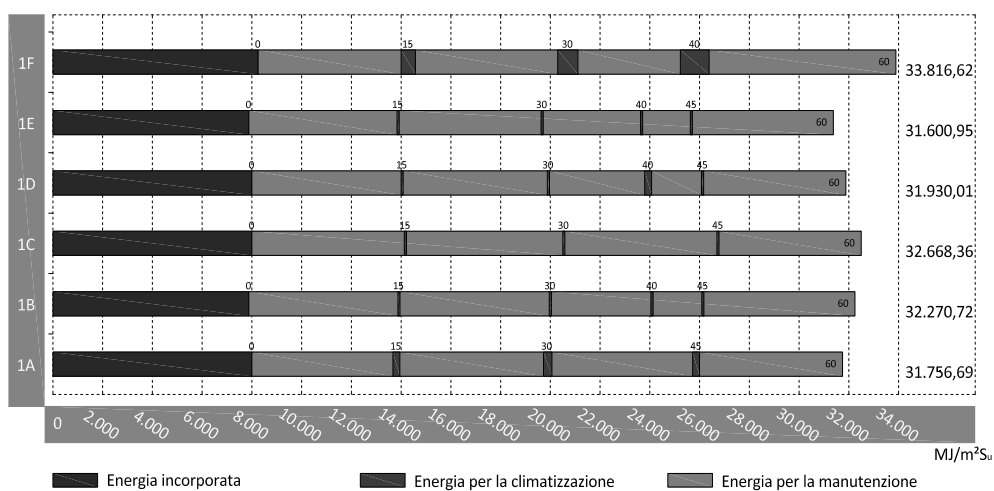


Fig. 4-10: Valutazione energetica LCA delle case unifamiliari per una vita utile di 60 anni

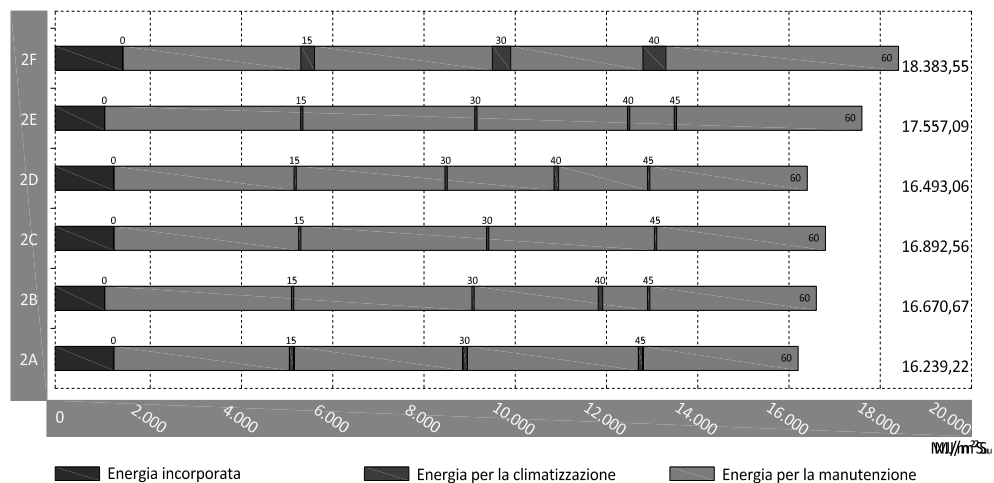


Fig. 4-11: Valutazione energetica LCA degli edifici a torre per una vita utile di 60 anni

#### 4.7. Interpretazione dei risultati

L'assunzione della variabile tempo determina un significativo aumento della complessità del sistema da osservare all'interno di un LCA, quando l'oggetto è costituito da manufatti edilizi.

Rispetto ad altri manufatti gli edifici hanno generalmente vite molto lunghe, che spesso si protraggono ben oltre quelle pensate in fase di programmazione e durante le quali possono presentarsi problematiche inattese legate all'attività complessa dell'edificio, che difficilmente possono essere previste sia dal punto di vista progettuale sia dal punto di vista delle ripercussioni che esse determinano sul comportamento ambientale.

I metodi per valutare la sostenibilità ambientale dell'edificio e per computare l'efficienza energetica nella fase d'uso spesso non tengono in considerazione il decadimento prestazionale dei materiali e componenti che lo compongono.

Lo studio condotto consente di affermare come dal punto di vista di una valutazione LCA statica le procedure siano ormai chiare: il confronto fra gli impatti ambientali di diverse soluzioni edilizie e la somma fra gli impatti ambientali e energetici fra le fasi di produzione e di uso e gestione dell'edificio sono step codificati e ampiamente trattati. Più difficile è affrontare l'LCA di un edificio tenendo presente i fenomeni che influenzano la durata di un edificio, la durata dei singoli componenti, i modi e i tempi che caratterizzano il degrado delle loro prestazioni.

Con riferimento al metodo di ricerca su indicato, se si presuppone l'impostazione dell'analisi LCA su dati ( $EE_{\text{produzione}}$  e FEP) considerati costanti, e si considerano le durate dei materiali per i cicli di manutenzione, che possono differire di molto a seconda della banca dati da cui si attinge, sarà molto difficile ridurre i gradi di incertezza dei risultati della valutazione.

Per alcuni prodotti esistono i certificati di garanzia della durata da parte delle aziende, quale fonte certa e unica del dato. Quindi il progettista è facilitato nella previsione dei cicli di manutenzione/sostituzione da considerare. In una analisi LCA non è corretto assumere una durata, ancorché desunta da una garanzia, indipendentemente dal contesto di riferimento che, nella fase d'uso, può incidere sulle prestazioni tecniche, su degradi o guasti. Nella analisi LCA, per esempio, il degrado di materiali e componenti influenza la valutazione di impatto energetico e ambientale perché esso determina un cambiamento della richiesta sia di energia per il riscaldamento invernale e raffrescamento estivo nel tempo sia di energie per la fase di manutenzione.

Inevitabilmente la complessità progettuale e di analisi LCA aumenta proporzionalmente alle variabili in gioco, ma aumentano anche le opportunità nella gestione del progetto: non è più la sfida di tempo e ambiente, ma gestione del rapporto edificio-tempo-ambiente.



## **CICLO DI VITA DELL'EDIFICIO E RIDUZIONE DEGLI IMPATTI AMBIENTALI\***

Sempre nell'ottica di una articolazione progettuale e costruttiva di circolarità dei flussi input e output di sostanze nel ciclo di vita di un edificio, nel caso ci si trovi di fronte alla scelta di soluzioni d'involucro iperisolate assemblate a secco, con componenti innovativi, è consigliabile svolgere una valutazione comparativa LCA fra diverse soluzioni tecniche, considerando l'intero ciclo di vita dell'edificio (dismissione compresa) in cui esse sono da mettere in opera, al fine di verificare l'eco-profilo dell'involucro progettato rispetto all'arco di vita del manufatto.

È interessante evidenziare che dal punto di vista dell'ecologista un edificio è solo una fase transitoria nel flusso di materiali e di energia nella biosfera gestito e assemblato per un breve periodo di uso, un periodo generalmente definito economicamente, pertanto il progettista deve essere consapevole di come il sistema progettato e tutte le sue parti componenti possono essere smontate o disassemblate in modo da consentire i massimi livelli di riuso e riciclo (Yeang, 2006). In questo punto nodale si colloca il progetto reversibile che deve comprendere e contemplare la progettazione delle fasi finali del ciclo di vita dell'edificio, consentendo di decostruire e valorizzare (dal riuso al riciclo) quanto più possibile materiali e componenti di rifiuto dall'edificio. Questo processo è strettamente dipendente dalla durata temporale stimata per la vita dell'edificio, e implica una gestione intelligente delle risorse in tutto l'arco temporale in cui sono coinvolte.

### **5.1. Scenari di innovazione tecnica, reversibilità e riciclo a fine vita nella scelta progettuale consapevole di materiali e componenti per la costruzione**

Si è già precedentemente sottolineato come la necessità di ripensare al processo progettuale e al processo costruttivo debba andare nella direzione di logiche "di chiusura del ciclo", considerando sotto lo stesso insieme fase costruttiva (con i materiali coinvolti) gestione, manutenzione, dismissione e anche il riutilizzo dei materiali di scarto, per soddisfare gli obiettivi normativi di riduzione "globale" dei consumi di energia, materia e emissioni nocive. Per poter disporre di un esame completo del comportamento ambientale di materiali e componenti, dalla culla alla tomba, è quindi necessario considerare, oltre al consumo di energia in fase d'uso, altre tipologie di impatto lungo tutte le fasi del ciclo di vita: l'energia incorporata nell'edificio, il consumo di acqua e di sostanze non rinnovabili, le emissioni di sostanze in acqua, aria e suolo, i loro effetti sulla qualità dell'ecosistema, sulla

*\*Tutti i grafici esiti delle valutazioni LCA sono elaborazione dell'autore e frutto del minuzioso supporto grafico e di layout di Lucia Ticozzi*



salute umana, eccetera. Non meno importante è la contestualizzazione della valutazione ambientale LCA, ove possibile, nel momento in cui si conoscono il contesto geografico e territoriale del progetto, al fine di dare risultati puntuali rispetto alle peculiarità e agli effetti locali che gli impatti generano.

In questo scenario l'attenzione si focalizza su un caso di studio, in cui si illustra una LCA di un edificio residenziale progettato e localizzato a Lodi, svolta parallelamente alla fase di realizzazione del manufatto edilizio. Sono state messe in opera diverse soluzioni di involucro innovative assemblate a secco, con prestazioni termiche elevate, di cui si sono confrontate le relative prestazioni ambientali. Un'ulteriore finalità del seguente trattato è la comparazione dell'incidenza degli impatti generati a seconda del tipo di involucro scelto sul danno totale dell'intero ciclo di vita, riferito agli anni di vita utile dell'edificio. Da questa tipologia di valutazioni emergono le potenzialità e i limiti dell'applicazione della metodologia LCA nell'ambito dell'architettura e dell'edilizia, e alcune indicazioni strategiche per un progetto che intende rispondere a requisiti di eco-compatibilità ambientale.

L'analisi LCA è stata svolta a tre livelli differenti:

- a. alla scala del materiale e componente, considerando e confrontando la fase manifatturiera di alcuni materiali edili e i relativi impatti;
- b. alla scala del subsistema tecnologico, attraverso un confronto di quattro soluzioni di chiusure verticali opache, con la previsione del relativo scenario di fine vita;
- c. alla scala dell'edificio, ai fini di una comparazione della fase di produzione e costruzione dei subsistemi di chiusura, con le fasi di gestione, manutenzione e di fine vita dei componenti dell'edificio stesso<sup>1</sup>.

La peculiarità di questo caso studio consiste da un lato nell'applicazione della valutazione LCA a un edificio residenziale progettato e realizzato, quindi con indicazioni precise di contesto, forma, orientamento, dall'altro nell'applicazione completa della procedura LCA fino alla pesatura degli impatti ambientali secondo standard ISO 14040, tramite un metodo di valutazione che consente di avere un punteggio finale di gravità dell'impatto dell'edificio e delle sue fasi di vita. Un altro aspetto di particolarità di tale caso studio è la definizione preventiva di uno scenario possibile di fine vita di materiali e componenti nella valutazione LCA, per capire le potenzialità che una pratica di riciclo può avere sugli impatti ambientali complessivi. I tre livelli di analisi LCA, interpretabili come i livelli di approfondimento del profilo ambientale di materiali, sistemi e edificio, sono rispettivamente applicabili alle tre fasi principali del processo progettuale: preliminare, definitivo e esecutivo; ciò significa che fin dalla prima fase del progetto è necessario abbozzare i primi confronti del profilo ambientale tra materiali e verificare la tecnologia costruttiva ipotizzata, per poi procedere sempre più approfonditamente, fino alla valutazione LCA globale dell'edificio, man mano il progetto si delinea definitivo e esecutivo. Da tali valutazioni ambientali emerge l'importanza dello stretto e inscindibile rapporto tra la scala dei materiali e componenti edili e quella dell'intero edificio, tra la vita utile dell'edificio, la durata e il possibile fine vita dei materiali.

La valutazione comparativa della seconda fase dell'analisi, alla scala del subsistema tecnologico dell'involucro verticale ha come oggetto soluzioni di involucro innovative assemblate a secco, con prestazioni termiche elevate; anche in questo caso laddove la

---

1. Occorre precisare che, per simulare l'incidenza della manutenzione dei materiali e componenti sull'impatto globale dell'edificio, si è escluso il contributo del decadimento prestazionale termico dei materiali e si sono considerati solo ipotetici cicli di sostituzione di involucro.

valutazione LCA è applicata a campi di indagine sperimentali, il progetto sperimentale ha come riferimento la produzione; quindi gli interlocutori (*stakeholder*) degli esiti della prima fase di indagine del caso studio, oltre al progettista, sono le aziende di produzione edilizia interessate a individuare i processi e i materiali che meglio riassumono caratteristiche prestazionali e comportamento ambientale. Facendo riferimento all'interesse per il progettista, questo caso studio rappresenta una matrice procedurale replicabile nel caso ci si trovi a confrontare subsistemi edilizi o a valutare l'intero edificio. Nello specifico tale studio può trovare efficace applicazione nel momento in cui si voglia considerare la fase post-consumo e di fine vita operativa, infatti l'individuazione preventiva dei possibili scenari futuri di smaltimento, riuso, riciclo o termovalorizzazione sono di enorme ausilio alla progettazione della flessibilità, rifunzionalizzazione e reversibilità dell'edificio e delle sue parti. Con riferimento alla sequenza delle fasi della procedura di valutazione LCA, approfondita nel capitolo 2, tale studio contempla le fasi di: a. Definizione degli scopi, dei confini del sistema e dell'unità funzionale, b. Analisi di inventario, c. Analisi degli impatti tramite la classificazione e la caratterizzazione, la normalizzazione e la pesatura del danno, d. Analisi di sensitività dei risultati ottenuti<sup>2</sup>. Rispetto ai casi studio dei due capitoli precedenti, il seguente prevede la valutazione LCA secondo tutti gli indicatori ambientali e fino all'ottenimento del punteggio singolo con la pesatura dei diversi danni, oltre la caratterizzazione. La fase di valutazione è stata condotta con tre metodi, messi a confronto: la procedura contemplata nel metodo di origine olandese degli ecoindicatori EcoIndicator 99<sup>3</sup>, quella contemplata nel metodo codificato in Svezia EPS 2000<sup>4</sup> e quella contemplata nel metodo codificato in Danimarca EDIP96<sup>5</sup>.

2. In tal caso obiettivo dell'analisi di sensitività è la verifica del valore minimo di impatto che emerge dall'ecobilancio dei consumi di materia e di energia nella vita utile dell'edificio: ovvero si verifica quale sia lo spessore dei materiali necessario e sufficiente affinché la somma fra gli impatti della fase di costruzione e della fase d'uso risulti minima.

3. Gli indicatori ambientali di tale metodo corrispondono alle seguenti categorie d'impatto, che tengono in considerazione, oltre ai danni relativi ai cambiamenti climatici, alla qualità dell'ecosistema e al consumo di risorse, anche i danni sulla salute umana: danni causati da sostanze cancerogene, - danni causati da sostanze organiche alle vie respiratorie, danni causati da sostanze inorganiche alle vie respiratorie, danni causati dai cambiamenti climatici, danni causati dalle radiazioni ionizzanti, danni causati dall'assottigliamento dello strato d'ozono.

4. Tale metodo classifica gli indicatori ambientali in quattro categorie di danno: *Human Health*, *Ecosystem Production Capacity*, *Abiotic Stock Resource*, *Biodiversity*. Le categorie d'impatto considerate in *Human Health* sono *Life Expectancy*, *Severe morbidity and suffering* (come la fame), *Morbidity* (come un raffreddore o un'influenza), *Severe Nuisance* (che normalmente induce una reazione in modo da evitare quanto più possibile il perdurare di un disturbo), *Nuisance* (irritante ma senza alcun effetto diretto sulla salute). Le categorie d'impatto considerate in *Ecosystem Production Capacity* sono *Crop Growth Capacity*, *Wood Growth Capacity*, *Fish and Meat Production*, *Soil Acidification*, *Production Capacity Irrigation Water*, *Production Capacity Drinking Water*. In *Abiotic Stock Resource* è considerata una sola categoria di impatto *Depletion of reserves*, così come in *Biodiversity* è considerata la categoria di impatto *Species Extinction* che rappresenta la frazione di specie scomparse, sul totale delle specie estinte in un anno, a causa delle emissioni in esame.

5. In *EDIP 96* come fattori di caratterizzazione si utilizzano degli indici proposti per le varie categorie da CML, nell'ottobre 1992, quali il Potenziale per il Riscaldamento Globale (*Global Warming Potential, GWP*) per valutare la modificazione dell'effetto serra e il Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico (*Ozone Depletion Potential, ODP*) per l'impovertimento dell'ozono, *Acidification*, *Eutrophication*, *Photochemical smog*, *Ecotoxicity water chronic*, *Ecotoxicity water acute*, *Ecotoxicity soil chronic*, *Human toxicity air*, *Human toxicity air*, *Human toxicity air*, *Bulk waste*, *Hazardous waste*, *Radioactive waste*, *Slag/ashes*, *Resources*. Il metodo EDIP, nella versione completa, non contempla l'estrazione e il consumo di risorse. Quella che presenta come ultima categoria *Resources* è il risultato della somma totale, approfondita per tipi di minerale nell'appendice al metodo, chiamata *EDIP (resource only)*. Quel risultato si presenta solo nella caratterizzazione di EDIP e non viene valutato.

Lo studio ha indagato le seguenti fasi del ciclo di vita: pre-produzione (Acquisizione delle risorse, trasformazione delle risorse in materiali ed energia), produzione fuori opera (lavorazione delle materie prime in semilavorati, produzione di componenti edilizi, assemblaggio di componenti e sub-componenti), fase operativa (climatizzazione interna e cicli di sostituzione dell'involucro<sup>6</sup>) e scenario di riciclo dei materiali a fine vita dell'edificio.

In mancanza di una banca dati LCI di materiali per l'edilizia italiana e per l'incompletezza delle informazioni su input e output dei processi produttivi di tipo primario, ovvero delle aziende, al fine di mantenere un'uniformità nei risultati, si è redatto l'inventario dei processi in analisi con il supporto di banche dati straniere, in particolare da quelle svizzere Ecolinvent e ETH-ESU e da IVAM olandese, contemplate nel software SimaPro 7.1.

## **5.2. Finalità di un'analisi LCA completa nella fase di progetto dell'edificio**

L'esame di un progetto in fase di realizzazione ha la finalità di comprendere la relazione fra fase di pre-consumo (produzione e costruzione di materiali e componenti con le relative energie incorporate) e fase d'uso con la quantificazione del fabbisogno energetico annuo, al fine di astrarre strategie per la valutazione dell'efficienza, applicabili ad altri casi di edifici. È comunemente risaputo che per ottenere maggior efficienza energetica, sia necessario impiegare in una costruzione più materiali, o comunque materiali con un'energia incorporata più elevata: servono pareti più spesse per avere bassi valori di trasmittanza termica; serramenti con prestazioni più elevate ottimizzano il controllo della radiazione solare, è richiesta massa termica aggiuntiva all'interno per permettere un accumulo temporaneo della radiazione solare entrante, per un successivo rilascio notturno. Mentre tutte queste strategie di efficienza energetica abbassano il fabbisogno di combustibile per la climatizzazione dell'edificio, non è direttamente intuibile se contemporaneamente questi fattori abbassino anche gli impatti ambientali e le energie nel ciclo di vita completo. Ovvero è necessario capire se l'energia aggiuntiva per la produzione di un serramento ad alte prestazioni viene equamente compensata dall'energia risparmiata nella fase d'uso oppure se la quantità aggiuntiva di impatti ambientali imputabili alla realizzazione di maggiori spessori di parete verticale esterna si bilancia con il risparmio energetico in fase d'uso.

### **5.2.1. Descrizione dell'obiettivo dell'analisi LCA dell' 'Edificio per minori' a Lodi**

Questo caso di studio è finalizzato all'indagine della relazione fra i consumi e le emissioni relativi alla filiera produttiva di materiali e componenti d'involucro, e i consumi e le emissioni relativi al fabbisogno di energia in fase d'uso, attraverso l'analisi di un edificio preso come caso di studio. L'analisi del ciclo di vita viene applicata a un edificio di nuova costruzione sperimentale che utilizza sistemi costruttivi innovativi al fine di indagarne l'efficacia sotto il profilo ambientale. L'obiettivo di questa LCA è individuare le conseguenze ambientali dovute alla realizzazione delle soluzioni tecniche leggere, assemblate a secco, utilizzate nel subsistema delle chiusure verticali esterne, al fine di minimizzare il loro carico ambientale nell'intero ciclo di vita.

---

6. Nella fase operativa si sono supposti tre differenti scenari di vita utile dell'edificio, comparando i risultati ottenuti con i cicli di sostituzione dei componenti dell'involucro edilizio.

Il percorso seguito ha inteso individuare alcune indicazioni per un progetto il più possibile rispondente ai requisiti di eco-compatibilità, oggi ineludibili, attraverso una comparazione di diversi sistemi di involucro attuata con alcuni metodi di analisi degli impatti, per permettere, in fase progettuale, una scelta più consapevole delle soluzioni meno dannose per l'ambiente, a parità di prestazioni (statiche e termiche). Inoltre tale studio approfondisce l'applicazione della metodologia di valutazione ambientale LCA alle diverse scale dell'edificio. Nel caso specifico, l'applicazione della metodologia LCA è alle scale di prodotto edilizio o componente, di subsistema tecnologico (chiusure verticali esterne opache) e di edificio.

- a. Prima analisi a scala di prodotto/componente e di subsistema tecnologico delle chiusure verticali esterne: in questa prima istanza è stata valutata ogni tipologia di involucro nel dettaglio, con i relativi materiali e componenti, per mettere in evidenza l'incidenza degli impatti di ogni singolo componente e degli impatti delle diverse fasi (produzione, trasporto, fine vita).
- b. E' stato condotto un secondo livello di analisi di tipo comparativo, che mette a confronto quattro tipologie di involucro, ipotizzate in fase progettuale per l'edificio in esame. Dal confronto emerge la tipologia più eco-efficiente.
- c. Seconda analisi a scala dell'edificio: allargando i confini alla fase d'uso, è stata effettuata una valutazione ambientale dell'intero involucro del complesso edilizio di Lodi e dei consumi energetici invernali.

E' stata trascurata la fase di cantiere, a causa dell'incertezza dei pochi dati a disposizione. Si presuppone che un tipo di costruzione a secco, come quella in analisi, dove i componenti e le parti dell'edificio sono prefabbricati, abbrevi i tempi della fase di messa in opera e non necessiti di molti macchinari ed energie.

### 5.2.2. Descrizione dell'edificio

Si tratta di un edificio destinato a una comunità di alloggio per minori, promosso dalla Fondazione Don Leandro Rossi – Famiglia Nuova allo scopo di recupero e di reinserimento sociale di minori in difficoltà. Si tratta di un progetto di edificio destinato a una comunità di alloggio per minori, cui la Fondazione Don Leandro Rossi – Famiglia Nuova intende promuovere un progetto di recupero e di reinserimento sociale di minori in difficoltà<sup>7</sup>. L'edificio, di due piani fuori terra, è di forma irregolare e orientato in direzione Nord - Sud. Esso è costituito da tre parti a differente destinazione:

---

7. Il progetto è nato da una convenzione tra la Fondazione e il Dipartimento BEST del politecnico di Milano, secondo cui la Fondazione, ricevendo in cambio prestazioni a titolo gratuito di progettazione, gestione e direzione lavori, si impegna ad applicare una serie di tecnologie innovative sperimentali, con la partecipazione di una serie di aziende del settore edilizio. *“La Fondazione si è posta l'obiettivo di dare una risposta articolata al fenomeno, sempre più manifesto, del disagio giovanile, che è il sintomo di una condizione esistenziale determinata non solo da disagio economico o da situazioni degradate, ma anche da una privazione culturale più complessiva della nostra società. Dopo un ampio confronto con altre realtà sociali, sia private che pubbliche, la Fondazione ha deciso di farsi promotrice di un intervento che agisca sia sul fronte terapeutico che su quello della prevenzione. I minori accolti in regime di residenzialità nel nuovo edificio verranno avviati ad un percorso educativo di recupero e di reinserimento. Le altre azioni, specificamente inquadrate nell'ambito della prevenzione, si costituiscono come fulcro di interventi sulla famiglia, sui suoi singoli componenti e sulle figure educative che agiscono sul territorio”.* Queste sono informazioni recepite dal *“Programma sperimentale multidisciplinare”* (2004) redatto dal gruppo di ricerca, coordinato dal Prof. Ettore Zambelli, dipartimento BEST, Politecnico di Milano

1. Una parte residenziale, di 400 m<sup>2</sup> circa, articolata in una zona giorno con uffici al piano terra<sup>8</sup> e una zona notte al primo piano<sup>9</sup>, con una lavanderia e uno spazio deposito. La fascia di terreno, che si sviluppa lungo il confine meridionale del lotto, è riservata alla realizzazione di orti, che verranno irrigati utilizzando acqua piovana; infatti tutte le coperture dell'edificio, in particolare le tre grandi ali rivolte a Sud, Est ed Ovest, sono state concepite per convogliare l'acqua su un ampio lucernario centrale vetrato e da qui ad una cisterna di accumulo. Il corridoio-ballatoio, che serve le stanze da letto al piano primo, definisce un'estesa apertura affacciata sul soggiorno in corrispondenza della quale la copertura dell'edificio è trasparente per garantire abbondanti livelli di illuminazione naturale, con una fascia anulare di aperture per la ventilazione estiva dell'intero organismo.
2. Una parte per uffici, di 220 m<sup>2</sup> circa, ad uso della Fondazione o di altri organismi (UNICEF, ecc.), articolato su due piani con ingresso indipendente da Nord e collegamento diretto al nucleo residenziale.
3. Un centro di incontro di circa 118 m<sup>2</sup>, che comprende spazi finalizzati all'incontro della comunità di minori con il mondo esterno, tramite una sala riunioni ed un'area espositiva, raccolte in un corpo indipendente a singolo piano.

Il progetto fa riferimento a soluzioni innovative di involucro e al paradigma costruttivo struttura/rivestimento (S/R), utilizzando una struttura portante metallica. L'edificio è interamente composto da elementi prefabbricati assemblati a secco. La fase cantieristica è consistita nell'accostamento e assemblaggio di componenti, con una riduzione dei tempi di cantiere. Inoltre la reversibilità dei componenti premette di favorire le procedure di intervento in caso di manutenzione e/o sostituzione di parti e l'eventuale disassemblaggio o demolizione selettiva a fine servizio dell'edificio.

La struttura portante della zona adibita a residenza e uffici è realizzata con pilastri tipo HE in acciaio, imbullonati alle piastre predisposte sul solaio contro terra, protetti con una pittura intumescente a base di solvente, e travi in legno lamellare di abete, in cui il solaio tra piano terra e primo è in lastre prefabbricate di legno a vista all'interno dei locali e blocchi di polistirolo, come materiale isolante. Per la parte adibita a centro d'incontro la struttura è di tipo metallico.

Le pareti perimetrali vengono sorrette con un sistema costruttivo basato sulla messa in opera di profili pressopiegati a freddo, connessi fra loro a formare una serie di telai contigui di piccola luce. Le tipologie di involucro sono quattro (fig. 5-6). Il progetto prevedeva di mettere in opera la tipologia A per i due volumi sporgenti della zona 1 Sud, la tipologia B per il resto dell'involucro della zona 2, quella C per il vano scale della parte 2 a Nord-Est. Per il centro d'incontro è stato messo in opera l'involucro di tipo D. Nei quattro tipi d'involucro si è sperimentato l'impiego di un componente innovativo per facciate ventilate, costituito da un pannello sandwich rigido (quale elemento di isolamento con poliuretano) e da un corrente in acciaio che realizza la camera ventilata e fornisce il supporto per il rivestimento

---

8. Il piano terra contiene un ampio soggiorno articolato in zone di seduta, settori per lo studio ed il lavoro e in una zona pranzo localizzata nei pressi di una serra rivolta a sud. Al piano terra si trovano anche un ufficio, uno studio ed una camera accessibile a portatori di handicap motorio, la cucina, una dispensa e il locale caldaia, con accesso indipendente dall'esterno.

9. Al primo piano, cui si accede da una scala che costituisce un corpo indipendente, si trovano cinque camere da letto, tutte dotate di spazi per lo studio, articolate in due singole (di cui una occupata dall'operatore), una doppia e due triple.

di facciata<sup>10</sup>. Per gli involucri A e B sono stati utilizzati i pannelli sandwich costituiti da due pannelli in legno di abete con del polistirene interposto (normalmente utilizzati per le coperture e qui reinterpretati per le chiusure verticali). Mediamente gli spessori di isolante di queste pareti è di 25 cm. Per il vano scale è stata scelta la realizzazione delle chiusure verticali con blocchi in calcestruzzo cellulare espanso autoclavato (tipo Gasbeton). Internamente per la parte residenziale è previsto il legno dei pannelli sandwich a vista, per la parte della sala conferenze sono previsti dei pannelli in cartongesso. Esternamente sono stati previsti tre tipi diversi di rivestimento, da appoggiare sui correnti in acciaio zincato dei pannelli sperimentali: tavole in cotto, lastre in fibrocemento e lastre in acciaio per la parte del centro d'incontro (fig. 5-6)<sup>11</sup>.

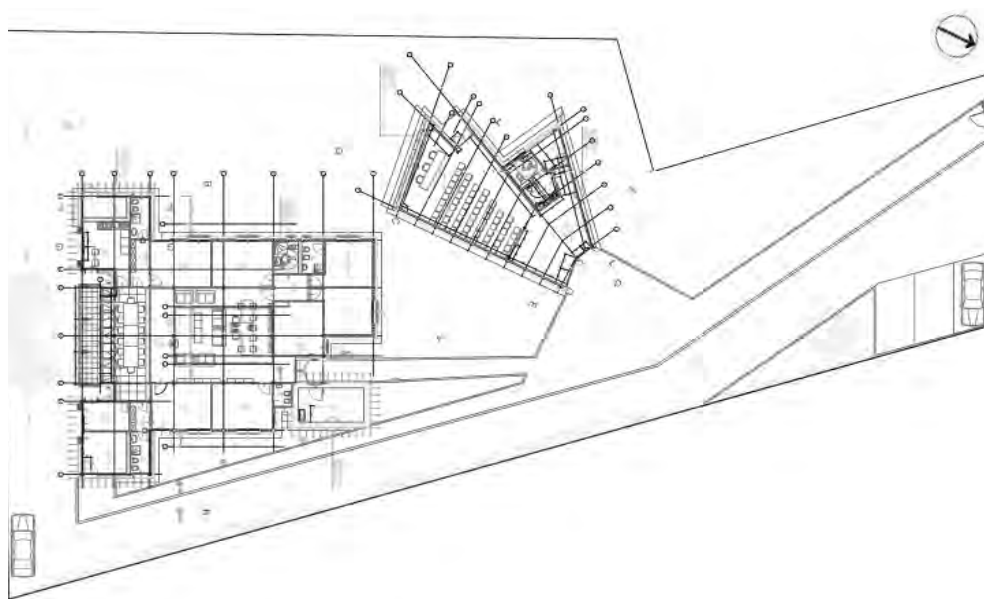


Fig. 5-1: Pianta dell'edificio 'Casa famiglia per minori' a Lodi (Fonte: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. Arch. Ettore Zambelli)

10. Tale elemento modulare, che si caratterizza per l'estrema leggerezza e la rapidità di messa in opera, è studiato per adattarsi a diversi tipi di supporto murario e può accogliere un'ampia varietà di rivestimenti - dall'intonaco tradizionale su lastre continue ad elementi discontinui in cotto o pietra. È una rivisitazione di un componente già in produzione in Italia, ma utilizzato sulle coperture inclinate (il corrente in acciaio funge da ferma tegola).

11. I serramenti per la residenza sono realizzati con profili in legno di abete non verniciato, con vetri termoisolanti. Per l'oscuramento delle finestre sono previste ante in legno. Per il centro d'incontro e per la residenza, i serramenti sono in profili scatolari, zincati e verniciati a fuoco, con persiane avvolgibili e con rivestimento interno di isolante termico. Per la serra, posizionata a Sud, sono stati previsti vetri isolanti termoacustici, con camera d'aria disidratata con sali minerali. La serra è stata prevista allo scopo di favorire i guadagni diretti durante la stagione di riscaldamento. L'impianto di riscaldamento integrativo è basato su pannelli radianti a pavimento, inseriti in masse a grande capacità termica. Per una parte della facciata a Sud si è previsto lo sviluppo, e l'utilizzo, di un componente fotovoltaico ibrido per la produzione di energia elettrica ed acqua calda sanitaria.

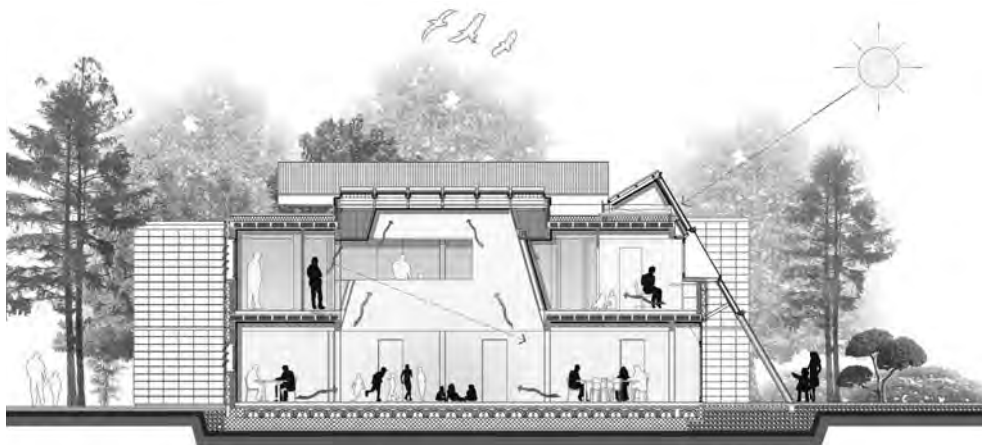


Fig. 5-2: Sezione longitudinale dell'edificio (Fonte: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. Arch. Ettore Zambelli)



Fig. 5-3: Sistema costruttivo assemblato a secco (Fonte: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. arch. Ettore Zambelli)



Fig. 5-4: Le fasi del cantiere (Fonte: foto dell'autore)



Fig. 5-5: Le soluzioni costruttive assemblate a secco ai fini della reversibilità (Fonte: foto dell'autore)

### 5.3. LCA alla scala del subsistema tecnologico delle chiusure verticali esterne

#### 5.3.1. Il sistema e la definizione dell'obiettivo

Il sistema preso in analisi è una parte dell'intero sistema edificio "casa famiglia" di Lodi e viene a sua volta approfondito in sottosistemi: materiali, processi di lavorazione, trasporti.

Nell'inventario riportato nei paragrafi successivi, i macchinari, le infrastrutture necessarie e lo spazio occupato dagli stabilimenti non sono esplicitati, ma si trovano a monte delle voci di processo riportate. Tuttavia questi elementi incidono per una minima parte (0,5%) sull'insieme degli input e output, al punto di poter essere trascurati. La funzione del subsistema tecnologico dell'involucro è quella di separare l'ambiente esterno da quello interno di edificio per mantenere le condizioni microclimatiche desiderate, quindi fungere



da regolatore di flussi. Gli elementi del subsistema costituiscono degli strati funzionali che devono ottemperare alle prestazioni richieste dell'involucro.

In questa prima istanza è stata valutata ogni tipologia di involucro nel dettaglio, con i relativi componenti, per mettere in evidenza l'incidenza degli impatti di ogni singolo componente e della fase di produzione rispetto alla fase di trasporto e di fine vita. Per tutti i materiali è stato ipotizzato uno scenario di fine vita volto al riciclaggio dei materiali.





	Involucro	Spessore	Materiale/elemento	Spessore degli elementi	Trasmittanza della parete
	Tipo	(cm)	I/E	(cm)	W/m <sup>2</sup> K
	A	37.4	Pannello sandwich (legno, EPS, legno)	17.4	0.109
			Pannello stratificato (poliuretano, pannello di alluminio goffrato)	12 - 16	
			Tavole in cotto	4	
	B	34.4	Pannello sandwich (legno, EPS, legno)	17.4	0.11
			Pannello stratificato (poliuretano, pannello di alluminio goffrato)	12 - 16	
				1	
	C	44	Pannello in fibrocemento		0.146
			Calcestruzzo cellulare espanso, tipo gasbeton	24	
			Pannello stratificato (poliuretano, pannello di alluminio goffrato)	12 - 16	
			Tavole in cotto	4	
	D	34.7	Pannello di cartongesso	2.5	1.125
			Lana di vetro	5	
			Intercapedine d'aria	5	
			Lana di vetro	5	
			Pannello in fibrocemento	1	
			Pannello stratificato (poliuretano, pannello di alluminio goffrato)	12 - 16	

Fig. 5-6: Le tipologie d'involucro codificate con le lettere A per la prima e B C D per le successive

### 5.3.2. Confini del sistema, unità funzionale e definizione dei flussi di riferimento

I confini del sistema "dalla culla al cantiere" comprendono: il reperimento delle materie prime, i trasporti dal sito di reperimento all'azienda, la fase di produzione, con le lavorazioni per ottenere i semilavorati e le successive lavorazioni, quali ad esempio laminazione, trafilatura, zincatura, ecc., per ottenere il prodotto finale, la fase di imballaggio ed eventuale stoccaggio, il trasporto in cantiere.

L'unità funzionale, ovvero la prestazione attesa (requisito), scelta per la valutazione del danno ambientale dovuto al ciclo di vita alla scala del subsistema tecnologico (chiusura verticale), è un m<sup>2</sup> di involucro con un valore di trasmittanza termica equivalente a 0,109

W/m<sup>2</sup>K, risultato del calcolo della trasmittanza di una delle soluzioni d'involucro del progetto. Quindi sulle soluzioni sopra proposte si sono operate alcune modifiche negli spessori degli isolanti per ottenere tale prestazione.

Tipo Involucro	Componente modificato	Incremento relativo di sp.	U-value iniziale	U-value finale	Spessore iniziale	Spessore finale
		cm	W/m <sup>2</sup> K	W/m <sup>2</sup> K	cm	cm
<b>A</b>	-	-	0.109	-	37,4	-
<b>B</b>	EPS	0,29	0,11	0.109	34,4	34,7
<b>C</b>	PUR	6	0,146	0.109	44	50
<b>D</b>	Lana di Vetro	4,16	0,125	0.109	34,7	38,86

Tab. 5-1: Modifiche negli spessori degli isolanti per ottenere la stessa prestazione termica

E' stato calcolato il flusso di riferimento (*reference flow*), in base all'unità funzionale (che definisce la parità di prestazione per le quattro tipologie di involucro):  $\Sigma$  (Area di riferimento \* Spessore<sub>n</sub> \* Peso specifico<sub>n</sub>).

Il flusso di riferimento è stato espresso in kg e, nel caso specifico, essendo riferito ad un m<sup>2</sup>, rappresenta anche la massa superficiale frontale [kg/m<sup>2</sup>]. Tale valore è ricavato dalla somma delle quantità specifiche del materiale di ogni strato, riportate nella tabella seguente. Come esempio, si riportano i sotto-processi, che compongono il processo della chiusura verticale definita CM\_Involucro A (U = 0,109).

Flusso di riferimento per un m <sup>2</sup> (kg)			
Chiusura Tipo A	Chiusura Tipo B	Chiusura Tipo C	Chiusura Tipo D
<b>99,23</b>	<b>67,37</b>	<b>186,25</b>	<b>77,5</b>

Tab. 5-2: Massa superficiale di un m<sup>2</sup> di involucro per le quattro diverse tipologie.

Si riportano per ogni tipologia i processi richiamati da banca dati, che compongono il processo della chiusura verticale in oggetto. Per ogni sotto processo si sono calcolati i quantitativi di materiale per soddisfare l'unità funzionale di riferimento.

Descrizione del sistema	CM_Inv A (U=0.109)	Categoria della banca dati			Building material
Commento	Involucro A: 1.blocco resistente Sapisol (legno di abete, polistirene, legno di abete) - 2.pannello Isoparete (alluminio, poliuretano, alluminio) - 3.tavelle in cotto				
	Spessore cm 37.4    Peso 1mq parete = 0.09923t				
	U.F. 1mq e trasmittanza U=0.109 W/m²K				
Materiali e combustibili	PROCESSI DI PRODUZIONE - MATERIALI				
Materiali		Quantità	Unità	Commento	
Brick (clay) Tavella in laterizio	voce del materiale da banca dati	0,043	ton	spessore 4 cm    V=1m²*0.04m=0.04m³ peso specifico cotto: 1.1-1.05 kg/m³ P=0.04mc*1.075t/m³=0.043t	
CM_reggitavella acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	10	p*	Peso/reggitavella 55gr=0.000055t*10pezzi= 0.00055t    si mettono negli incroci/ogni staffa; regge gli spigoli di 4 lastre	
CM_profilo C acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	4	p*	Lungh.=1m    Largh.=0.28m Sp.med.=0.0006m    V=0.000168m³ P=0.000168*7.85t/m³=0.00132t  n.4 profili per 1m² = 0.00528t	
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso	1	p*	1m²*0.002m=0.002m³ P=0.002m³*2.6t/m³=0.0052t	
PUR rigid foam P Pannello di poliuretano	voce del materiale da banca dati	0,004408	ton	1m²*0.116m=0.116m³ P=0.116m³*0.038t/m³=0.004408t	
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso	1	p*	1m²*0.002m=0.002m³ P=0.002m³*2.6t/m³=0.0052t	
Wood profiled spruce Pannello multistr. legno	voce del materiale da banca dati	0,0148	ton	1m²*0.02m=0.02m³ P=0.02*0.74t/m³=0.0148t	
PS (EPS) B250 (1998) Polistirene	voce del materiale da banca dati	0,00603	ton	1m²*0.134=0.134m³ P=0.134m³*0.045t/m³=0,00603t	
Wood profiled spruce Pannello multistrato in legno	voce del materiale da banca dati	0,0148	ton	1m²*0.02m=0.02m³ P=0.02*0.74t/m³=0.0148t	

Tab. 5-3: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A.

Descrizione del sistema	CM_Inv B (U=0.109)	Categoria della banca dati		Building material
Commento	Involucro B: 1.blocco resistente Sapisol (legno di abete,polistirene, legno di abete) - 2.pannello Isoparete (alluminio, poliuretano, alluminio) - 3.lastre in fibrocemento			
	Spessore cm 34,7    Peso 1mq = 0.06737t			
	U.F. 1mq e trasmittanza k=0.109 W/mq K			
Materiali e combustibili	PROCESSI DI PRODUZIONE - MATERIALI			
Materiali		Quantità	Unità	Commento
pannello di fibrocemento	voce del sottoprocesso*	1	p	spessore 1 cm V=1mq*0.01m=0.01mc peso specifico fibrocemento: 1.4t/mc P=0.01mc*1.4t/mc=0.014t
CM_reggilastra acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	3	p	Peso/reggilastra 30gr=0.00003t*3pezzi= 0.00009t si mettono negli incroci/ogni staffa; regge gli spigoli di 4 lastre
CM_profilo C acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	2	p	L=1m l=0.28m sp.med.=0.0006m V=0.000168mc P=0.000168*7.85t/mc=0.00132t n.2 profili per 1mq== 0.00264t
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso*	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
PUR rigid foam P	voce del materiale	0,004408	ton	1mq*0.116m=0.116mc P=0.116mc*0.038t/mc=0.004408t
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso*	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
Wood profiled spruce	voce del materiale	0,0148	ton	1mq*0.02m=0.02mc P=0.02*0.74t/mc=0.0148t
PS (EPS) B250 (1998)	voce del materiale	0,00616	ton	1mq*0.1369m=0.1369mc P=0.1369mc*0.045t/mc=0,00616t
Wood profiled spruce	voce del materiale	0,0148	ton	1mq*0.02m=0.02mc P=0.02*0.74t/mc=0.0148t

Tab. 5-4: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B.

\*p= processo: a monte di tale voce ci sono una serie di altri processi, che sono stati accorpati in un processo,e di alcuni si sono modificate le quantità.

\*\* Tali quantità sono i flussi di riferimento per singolo materiale. Dove ho "p" nella colonna, trovo il corrispondente valore in tonn. nella colonna "commenti".

Descrizione del sistema	CM_Inv C (U=0.109)	Categoria della banca dati	Building material	
Commento	Involucro C: 1.blocco resistente Gasbeton - 2.pannello Isoparete (alluminio, poliuretano, alluminio) - 3.tavelle in cotto			
	Spessore cm 50   Peso 1mq parete = 0.18625t			
	U.F. 1mq e trasmittanza k=0.109 W/mq K			
Materiali e combustibili                   PROCESSI DI PRODUZIONE - MATERIALI				
Materiali		Quantità	Unità	Commento
Brick (clay)	voce del materiale	0,043	ton	spessore 4 cm   V=1mq*0.04m=0.04mc peso specifico mattone forato: 1.1-1.05 P=0.04mc*1.075t/mc=0.043t
CM_reggitavelle acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	10	p	Peso/reggitavella 55gr=0.000055t*10pezzi=0.00055t   si mettono negli incroci/ogni staffa; regge gli spigoli di 4 lastre
CM_profilo C acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	4	p	L=1m l=0.28m sp.med.=0.0006m V=0.000168mc P=0.000168*7.85t/mc=0.00132t  n.4 profili per 1mq = 0.00528t
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso*	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
PUR rigid foam P	voce del materiale	0,006688	ton	1mq*0.176m=0.176mc P=0.176mc*0.038t/mc=0.006688t spess. 9.16cm
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso*	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
Gasbeton	voce del sottoprocesso*	0,12	ton	spessore 24 cm V=1mq*0.24m=0.24mc peso specifico gasbeton: 0.5t/kg P=0.24mc*0.5t/mc=0.12t
Cement masonry C 1998(IVAM)	voce del materiale	0,0162	ton	in un mq ci stanno 6 blocchi di gasbeton e i mc necessari di collante sono, per le fughe da 1cm: 5 fughe*1ml*0.01m*0.24m (spessore) = 0.012mc  peso specifico collante: 1.35 t/mc P=0.012mc*1.35t/mc=0.0162t

Tab. 5-5: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C.

Descrizione del sistema	CM_Inv D (U=0.109)	Categoria della banca dati		Building material
Commento	Involucro D: 1.doppia lastra in cartongesso - 2. lana di vetro - 3.intercapedine - 4 lana di vetro - 5.lastra in fibrocemento - 6.pannello Isoparete - 7.lastra in acciaio			
	Spessore cm 38.86    Peso 1mq parete = 0.0775t			
	U.F. 1mq e trasmittanza k=0.109 W/mq K			
Materiali e combustibili	PROCESSI DI PRODUZIONE – MATERIALI			
Materiali		Quantità	Unità	Commento
CM_1 mq lamiera acciaio	voce del sottoprocesso*	1	p	spessore 0.2 cm V=1mq*0.002m=0.002mc peso specifico acciaio Uginox (ditta): 7.9t/mc P=0.002mc*7.9t/mc=0.0158t
CM_reggilastre acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	3	p	Peso/reggilastra 30gr=0.0003t*3pezzi=0.0009t si mettono negli incroci/ogni staffa; regge gli spigoli di 4 lastre
CM_profilo C acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	4	p	L=1m l=0.28m sp.med.=0.0006m V=0.000168mc P=0.000168*7.85t/mc=0.00132t n.4 profili per 1mq = 0.00528t
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso*	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
PUR rigid foam P	voce del materiale	0,004408	ton	1mq*0.116m=0.116mc P=0.116mc*0.038t/mc=0.004408t
Cm_1mq pannello di alluminio 50%rec.	voce del sottoprocesso	1	p	1mq*0.002m=0.002mc P=0.002mc*2.6t/mc=0.0052t
pannello di fibrocemento	voce del sottoprocesso*	1	p	spessore 1 cm V=1mq*0.01m=0.01mc peso specifico fibrocemento: 1.4t/mc P=0.01mc*1.4t/mc=0.014t
CM_1 mq pannello lana di vetro	voce del sottoprocesso*	1,8	p	V=1mq*0.0916=0.0916mc peso specifico lana vetro: 0.02t/mc P=0.0916mc*0.02t/mc=0,0018t
cartongesso (da IVAM modificato CM)	voce del sottoprocesso*	0,019	ton	V=1mq*0.025m=0,025mc peso specifico cartongesso: 0.76t/mc P=0.025mc*0.76t/mc=0.019t
CM_1 mq pannello lana di vetro	voce del sottoprocesso*	1	p	V=1mq*0.05=0.05mc peso specifico lana vetro: 0.02t/mc P=0.05mc*0.02t/mc=0,001t
CM_profilo C acciaio zincato	voce del sottoprocesso*	2	p	da sostegno a lana di roccia, cartongesso L=1m l=0.366m sp.med.=0.003m V=0.0011mc P=0.0011*2.6t/mc=0.00286t
CM_viti per cartongesso lunghe	voce del sottoprocesso*	4	p	4 viti in un ml in verticale di fissaggio del cartongesso ai montanti (0.001kg x 4=0.004kg)

Tab. 5-6: Caratteristiche degli strati di componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D.

Riguardo ai consumi di energia coinvolti, per come è stato impostato il processo CM\_Involucro A ( $U = 0,109\text{W/m}^2\text{K}$ ), le lavorazioni dei materiali semilavorati, quali laminazione, zincatura, ecc., per l'ottenimento del prodotto finito, sono state incluse nelle voci di sottoprocesso riportate nella tabella precedente.

In questa categoria sono stati indicati solo i trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere; in alcuni casi, quali quello del pannello sandwich legno-EPS-legno, la distanza è stata calcolata fra l'azienda, il rivenditore (in questo caso noto) e il cantiere. Il mezzo di trasporto è un camion con portata da 28 tonn per km. I trasporti sono stati espressi in tkm. Si è scelto questo sistema di trasporto, poiché in Italia è quello maggiormente utilizzato. Considerando il solo trasporto di merci è possibile stimare che il 60% circa dell'energia associato a questo tipo di trasporto è da attribuire al consumo di combustibile (fase d'uso e fase di produzione del combustibile), il 30% circa alla costruzione e alla manutenzione del veicolo e approssimativamente il 10% alla realizzazione delle infrastrutture<sup>12</sup>. In questa sede si sono presi in considerazione principalmente i mezzi di trasporto a motore a benzina.

Elettricità/ energia	Involucro A - PROCESSI - LAVORAZIONI - TRASPORTI			
Trasporti - processi	Distanze	Quantità	Unità	Commenti
Truck 28t Camion da 28 t	0.043t*35km=1.505tkm	1,505	tkm	trasporto delle tavelle: da Piacenza a Lodi: 35km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00055t*35km=0.01925tkm	0,01925	tkm	trasporto delle reggitavelle: da Piacenza a Lodi: 35km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00132t*64km*4=0.338tkm	0,338	tkm	trasporto dei correnti: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0.0104t*64km=0.6656tkm (si è considerata già la quantità doppia)	0,6656	tkm	trasporto dell'alluminio: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0.004408t*64km=0.2821tkm	0,2821	tkm	trasporto del PUR: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0.0296t*561km=16.6056tkm (le tonn. Sono per le 2 lastre)	16,6056	tkm	trasporto del legno: dalla Francia (Morteau) a Lodi: 561km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00603t*561km=3.38283tkm	3,38283	tkm	trasporto dell'EPS: dalla Francia (Morteau) a Lodi: 561km

Tab. 5-7: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A.

12. Dati [www.apat.it](http://www.apat.it) sul fattore di emissione medio dei mezzi di trasporto in Italia.

<b>Elettricità/ energia</b>	<b>Involucro B - PROCESSI - LAVORAZIONI - TRASPORTI</b>			
<b>Trasporti - processi</b>	<b>Distanze</b>	<b>Quantità</b>	<b>Unità</b>	<b>Commenti</b>
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.014t*61km=0.854tkm	0,854	tkm	trasporto delle lastre in fibrocemento: da Verolanuova (BS) a Lodi: 61km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.00009t*61km=0.00549tkm	0,00549	tkm	trasporto delle reggilastre: Verolanuova (BS) a Lodi: 61km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.00264t*64km=0.169tkm	0,169	tkm	trasporto delle traverse: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.0104t*64km=0.6656tkm (si è considerata già la quantità doppia)	0,6656	tkm	trasporto dell'alluminio: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.004408t*64km=0.2821tkm	0,2821	tkm	trasporto del PUR: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.0296t*561km=16.6056tkm (si è considerata già la quantità doppia)	16,6056	tkm	trasporto del legno: dalla Francia (Morteau) a Lodi: 561km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.00616t*561km=3.456tkm	3,456	tkm	trasporto dell'EPS: dalla Francia (Morteau) a Lodi: 561km

Tab. 5-8: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B.

<b>Elettricità/ energia</b>	<b>Involucro C - PROCESSI - LAVORAZIONI - TRASPORTI</b>			
<b>Trasporti - processi</b>	<b>Distanze</b>	<b>Quantità</b>	<b>Unità</b>	<b>Commenti</b>
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.043t*35km=1.505tkm	1,505	tkm	trasporto delle tavole: da Pontenure a Lodi: 35km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.00055t*35km=0.01925tkm	0,01925	tkm	trasporto delle reggitavole: da Pontenure a Lodi: 35km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.00132t*64km*4=0.338tkm	0,338	tkm	trasporto dei correnti: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.0104t*64km=0.6656tkm	0,6656	tkm	trasporto dell'alluminio: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.006688t*64km=0.4280tkm	0,428	tkm	trasporto del PUR: da Carate Brianza a Lodi: 64km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.12t*35km=4.2tkm	4.2	tkm	trasporto del Gasbeton: da Pontenure a Lodi: 35km
<i>Truck 28t</i> Camion da 28 t	0.0162t*35km=0.567tkm	0.567	tkm	trasporto del collante per Gasbeton: da Pontenure a Lodi: 35km

Tab. 5-9: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C.



Elettricità/ energia	Involucro D - PROCESSI - LAVORAZIONI - TRASPORTI			
Trasporti - processi	Distanze	Quantità	Unità	Commenti
Truck 28t Camion da 28 t	0.0158t*560km=8.848tkm	8,848	tkm	trasporto delle lastre in acciaio specchiato: da Lusignan (Francia) a Lodi: 560km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00009t*560km=0.00504tkm	0,00504	tkm	trasporto delle reggilastre da Lusignan (Francia) a Lodi: 560km
Truck 28t Camion da 28 t	0.014t*61km=0.854tkm	0,854	tkm	trasporto delle lastre in fibrocemento: da Verolanuova (BS) a Lodi: 61km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00528t*64km=0.338tkm	0,338	tkm	trasporto dei correnti: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0.0104t*64km=0.6656tkm	0,6656	tkm	trasporto dell'alluminio: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0.004408t*64km=0.2821tkm	0,2821	tkm	trasporto del PUR: da Carate Brianza a Lodi: 64km
Truck 28t Camion da 28 t	0,001t*31km=0.031tkm 0,0018t*31km=0.0558tkm (0.0558+0.031)=0,0868tkm	0,0868	tkm	trasporto della lana di vetro: da Vidalengo (BG) a Lodi: 31km
Truck 28t Camion da 28 t	0.019t*290km=5.51tkm	5,51	tkm	trasporto del cartongesso: da Castellina Marittima (PI) a Lodi: 290km
Truck 28t Camion da 28 t	0.00286t*290km=0.83tkm x n.2 =1.66tkm	1,66	tkm	trasporto dei montanti x cartongesso da Castellina Marittima (PI) a Lodi: 290km

Tab. 5-10: Trasporti su gomma dall'azienda produttrice al cantiere dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D.

Riguardo alla gestione della manutenzione è difficile fare delle previsioni dettagliate relativamente alla durabilità dei materiali e alla fase di gestione e manutenzione di un manufatto edilizio e dei suoi componenti. Gli aspetti coinvolti in questa fase sono tuttavia rilevanti per un bilancio complessivo. In questa sede si è preferito omettere tale valutazione, non rientrante negli obiettivi di tale indagine.

Relativamente agli scenari di fine vita, il trattamento di riciclo in questa specifica analisi è stato associato ai materiali dal momento che l'assemblaggio a secco consente la reversibilità e quindi la demolizione selettiva con il recupero dei componenti. Sono state assunte le stesse quantità del materiale in entrata all'inizio del ciclo di vita per il materiale in uscita, dopo la demolizione selettiva.

Involucro A - TRATTAMENTO DI FINE VITA					
Tipo di rifiuto da trattare	Categoria nella banca dati	Quantità*	Unità	Definizione del trattamento	Commento
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,043	ton	riciclo mat.edile con disc.evitata	tavole in cotto
Solido	<i>Steel scrap</i> - Scarti di acciaio	0,00055	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	reggitavole
Solido	<i>Steel scrap</i> - Scarti di acciaio	0,00528	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	montanti per rivestimento esterno
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Scarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lamiera di alluminio
Solido	PUR - Poliuretano	0,004408	ton	<i>Recycling Plastics (excl. PVC) B250</i>	n.1 lamiera di PUR
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Scarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lamiera di alluminio
Solido	PS - Polistirene	0,00603	ton	<i>Recycling PS B250</i>	n.1 pannello di EPS
Solido	Wood - Legno	0,0148	ton	<i>Recycling wood (sub)</i>	n.1 pannello di legno
Solido	Wood - Legno	0,0148	ton	<i>Recycling wood (sub)</i>	n.1 pannello di legno

\* Tali valori corrispondono a quelli relativi al flusso di riferimento per ogni materiale riportati nel sottoparagrafo dei materiali.

Tab. 5-11: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo A.

Involucro B - TRATTAMENTO DI FINE VITA					
Tipo di rifiuto da trattare	Categoria nella banca dati	Quantità*	Unità	Definizione del trattamento	Commento
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,014	ton	riciclo mat.edile con disc.evitata	n. 1 pannello di fibrocemento
Solido	<i>Steel scrap</i> - Scarti di acciaio	0,00009	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	reggilastra in fibrocemento
Solido	<i>Steel scrap</i> - Scarti di acciaio	0,00264	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	montanti per rivestimento esterno
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Scarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	PUR - Poliuretano	0,004408	ton	<i>Recycling Plastics (excl. PVC) B250</i>	n.1 lastra di PUR
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Scarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	PS - Polistirene	0,00616	ton	<i>Recycling PS B250</i>	n.1 pannello di EPS
Solido	Wood - Legno	0,0148	ton	<i>Recycling wood (sub)</i>	n.1 pannello di legno
Solido	Wood - Legno	0,0148	ton	<i>Recycling wood (sub)</i>	n.1 pannello di legno

Tab. 5-12: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo B.

Involucro C - TRATTAMENTO DI FINE VITA					
Tipo di rifiuto da trattare	Categoria nella banca dati	Quantità*	Unità	Definizione del trattamento	Commento
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,043	ton	riciclo mat.edile con disc. evitata	tavole in mattone forato
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00055	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	reggitavole
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00528	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	montanti per rivestimento esterno
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Sarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	<i>PUR</i> - Poliuretano	0,006688	ton	<i>Recycling Plastics (excl. PVC) B250</i>	n.1 lastra di PUR
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Sarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0.12	ton	riciclo mat.edile con disc. evitata	gasbeton
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,0162	ton	riciclo mat.edile con disc. evitata	Collante cementizio per gasbeton
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,043	ton	riciclo mat.edile con disc. evitata	tavole in mattone forato

Tab. 5-13: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo C.

Involucro D - TRATTAMENTO DI FINE VITA					
Tipo di rifiuto da trattare	Categoria nella banca dati	Quantità*	Unità	Definizione del trattamento	Commento
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,0158	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	Rivestimento in acciaio
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00009	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	reggilastra
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00528	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	traversi
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Sarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	<i>PUR</i> - Poliuretano	0,004408	ton	<i>Recycling Plastics (excl. PVC) B250</i>	n.1 lastra di PUR
Solido	<i>Aluminium scrap</i> - Sarti di alluminio	0,0052	ton	<i>Recycling aluminium B250</i>	n.1 lastra di alluminio
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,014	ton	riciclo mat.edile con disc. evitata	fibrocemento
Solido	<i>Building material</i> - Materiale edile	0,0028	ton	<i>Recycling glass B250</i>	2 pannelli di lana di vetro
Solido	<i>Cardboard</i> - Cartongesso	0,019	ton	<i>Recycling Cardboard per cartongesso</i>	doppio pannello di cartongesso
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00286	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	montante per cartongesso
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,00286	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	montante per cartongesso
Solido	<i>Steel scrap</i> - Sarti di acciaio	0,000004	ton	<i>Recycling ECCS steel B250</i>	viti per cartongesso

Tab. 5-14: Scenario di riciclo a fine vita dei componenti costituenti la soluzione di involucro tipo D.

### 5.3.3. Analisi dell'inventario

La LCI prevede il computo dei flussi di materiali, sostanze, liquidi e gas in entrata e in uscita, le emissioni in aria, acqua e suolo.

No	Sostanze	Compartimento	Unità	Totale	Brick (clay)	CM_reg- gitavelle acciaio zincato	CM_profi- lo C acciaio zincato	CM_1mq lamiera di alluminio	PUR rigid foam P	CM_1mq lamiera di allumi- nio	Wood profiled spruce	Board EPS (DHV)	Wood profiled spruce
1	energy from biomass	Raw	kJ	4.3	x	x	x	x	x	x	x	4.3	x
2	energy from hydrogen	Raw	kJ	29	x	x	x	x	x	x	x	29	x
4	heat losses to soil	Non mat.	MJ	1	0.013	0.026	0.98	0.0066	x	0.0066	0.016	0.0029	0.016
5	biomass (feedstock)	Raw	MJ	1.7	x	x	x	x	1.7	x	x	x	x
6	potential energy water ETH	Raw	MJ	10	0.13	x	x	x	x	x	4.9	x	4.9
7	energy from lignite	Raw	MJ	11	x	x	x	x	11	x	x	0.0063	x
8	energy from uranium	Raw	MJ	31	x	0.0042	0.049	x	30	x	x	0.4	x
10	energy from coal	Raw	MJ	61	x	x	x	x	61	x	x	0.27	x
11	energy from oil	Raw	MJ	1.6E2	x	x	x	x	1.3E2	x	x	22	x
12	energy from natural gas	Raw	MJ	2.3E2	x	x	x	x	2.2E2	x	x	8.7	x
13	waste heat to air	Non mat.	MJ	2.9E2	15	x	x	x	x	x	1.2E2	x	1.2E2
14	CO <sub>2</sub> (non-fossil)	Air	kg	-46	x	x	x	x	x	x	-40	x	-40
15	CO	Air	g	-7.2E2	7	10	99	1.6E2	12	1.6E2	-2.3E2	7.3	-2.3E2
16	SO <sub>x</sub> (as SO <sub>2</sub> )	Air	g	-1.2E2	5.9	3.4	33	1.5E2	x	1.5E2	66	72	66
17	suspended substances	Water	g	-1.2E2	3.9	0.28	3.2	13	1.2E2	13	7	5.5	7
18	DOC	Water	g	-21	0.044	0.00092	0.0088	0.014	x	0.014	0.0052	0.33	0.0052
19	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Water	g	-4.3	x	x	x	2.1	x	2.1	x	x	x
20	CFC-14	Air	g	-2.1	0.00035	1.7E-5	0.00047	1	x	1	0.0018	2.7E-5	0.0018
21	PAH's	Air	mg	-2.2E2	1.3	0.033	0.39	1E2	x	1E2	0.86	19	0.86
25	Sb	Water	μg	-22	27	1.9	29	5.6	x	5.6	51	5.9	51
26	CxHy halogenated	Air	μg	-7.8	x	0.055	0.53	5.3	x	5.3	0.0021	0.63	0.0021
28	dioxin (TEQ)	Air	ng	-1.5E2	0.16	0.0065	0.11	0.018	x	0.018	-76	0.019	-76
29	HFC-134*	Air	pg	-4E-5	4.4E-7	x	x	x	x	x	-2.1E-5	x	-2.1E-5
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tab. 5-15: Stralcio esemplificativo della tabella d'inventario per l'involucro di tipo A.

### 5.3.4. Valutazione ambientale e interpretazione dei risultati

Le voci di inventario, rispetto alla procedura LCA, vengono classificate nelle categorie di danno e poi nelle categorie d'impatto. Tali categorie "di raggruppamento" delle sostanze sono specifiche per ogni metodo di valutazione. Le quantità delle sostanze vengono in sequenza caratterizzate in unità di misura tipiche di ogni categoria di impatto, normalizzate e valutate: da quantità non omogenee (es. kg, MJ, oz., ...) si passa a unità di misura definite dai metodi per le rispettive categorie di impatto e, attraverso la valutazione, ad un valore in Punto.

#### 5.3.4.1. Analisi del singolo processo

La prima valutazione dell'involucro A è stata ottenuta con il metodo EcoIndicator99. Il danno totale generato dalla fase pre-consumo per la produzione e il trasporto in cantiere dell'involucro A, dopo la caratterizzazione, la normalizzazione e la valutazione, ammonta a 7,93 Pt dovuto per il 53.75% a danni incidenti sulla *Ecosystem Quality*, per il 40.32% a danni incidenti sulla *Resources* e per il 5.94% a danni incidenti sulla *Human Health*. Inoltre, sul totale, il danno evitato relativo ai processi di trattamento a fine vita è dovuto per il -48,09% a *Recycling aluminium B250* (processo di riciclo dell'alluminio)<sup>13</sup>, mentre il danno relativo alla fase di produzione dei materiali e componenti coinvolti è dovuto per il 53,29% (4,25 Pt) a *Wood profiled spruce* (pannello profilato in legno di abete) e per il 39,84% (3,16 Pt) a *Board EPS (DHV)* (pannello di polistirene). Ciò significa nel primo caso che l'impiego di alluminio riciclato, riciclabile di nuovo alla fine della sua vita, ha un peso estremamente positivo nel bilancio complessivo e rispetto ai contributi degli altri materiali coinvolti. Nel secondo caso i risultati sono così interpretabili: la produzione del pannello di legno per fare il sandwich legno-EPS-legno determina maggiore impatto rispetto alle altre filiere produttive, quella del pannello in EPS è la seconda nella graduatoria degli impatti. Nella specificità del metodo olandese Ecoindicator 99, l'impatto maggiore delle lastre di legno è determinato dalla categoria di impatto *Land use* (Uso del suolo) e ciò è spiegabile considerando la logica con cui il metodo, tarato sul territorio "limitato" dei Paesi Bassi, pesa gli impatti ambientali: usare il legno come materiale da costruzione appare penalizzante per tale territorio, non disponendo di suolo sufficiente per assicurare la silvicoltura e quindi i cicli di crescita delle foreste per l'approvvigionamento del legno; ciò implica di conseguenza approvvigionarsi di legname dall'estero, quindi con consumi e impatti ambientali per i trasporti aggiuntivi e, ai fini di una eco-efficienza della filiera costruttiva, poco vantaggiosi. Di conseguenza nel metodo gli impatti relativi alla categoria *Land Use* hanno un fattore di pesatura dello stesso relativamente alta rispetto ad altre categorie.

Ponendo a confronto i risultati parziali dei danni di produzione con quelli attribuiti ai trasporti, emerge chiaramente come la fase di produzione dei materiali incida in maniera preponderante sull'impatto rispetto al danno provocato dai trasporti dei materiali dall'azienda al cantiere (traducendo l'affermazione rispetto al grafico in fig. 5-7 gli istogrammi centrali di segno positivo, quelli dei danni di produzione, sono nettamente più alti di quelli a destra del grafico, che rappresentano i danni del trasporto). Relativamente ai trasporti, il 72% sul valore totale è attribuibile al trasporto dei pannelli in legno dalla Francia all'Italia, poiché il peso per km di tali componenti è il maggiore rispetto agli altri (16,6 tkm) e i chilometri sono nettamente superiori rispetto al percorso che fanno gli altri componenti d'involucro.

Come si evince dal grafico di fig. 5-7, è possibile trarre alcune considerazioni dal confronto degli istogrammi centrali, relativi ai danni delle filiere di produzione: è noto che la valutazione ambientale del ciclo di vita si basa sul flusso dei materiali necessari ad assolvere la prestazione richiesta, per cui la densità dei materiali utilizzati diviene una variabile particolarmente critica: in generale è possibile affermare che un componente pesante presenta impatti ambientali superiori rispetto a un componente leggero. Tuttavia questo studio consente di

13. Nel dettaglio del danno evitato circa il 55% riguarda la categoria *Fossil Fuels*, ovvero con il riciclo dell'alluminio si evitano di consumare ulteriori nuove quantità di combustibili fossili.

dimostrare come ciò sia vero se la valutazione è fatta solo per alcuni indicatori di danno ambientale, ad esempio per l'energia incorporata (dove il valore totale in MJ è l'esito del prodotto fra il valore unitario (MJ/kg) e i kg di peso del componente in esame); quando l'esito della valutazione è la somma di danni di diversa natura (come somma di danni relativi al consumo di risorse, di danni incidenti sull'acidificazione, sull'eutrofizzazione, di danni sulla salute umana) questa proporzionalità fra peso e impatto non sussiste. Come si osserva nella figura 5-7 il punteggio singolo di impatto ambientale dovuto alla produzione di un metro lineare di un corrente in acciaio, costituito da una lamiera piegata a freddo, forata, di ingombro 4 cm (componente del pannello sandwich Isoparete), è più impattante di un m<sup>2</sup> di tavole in cotto di spessore 4 cm, con un peso notevolmente superiore al corrente in acciaio.

Dalla fig. 5-7 emerge inoltre come, quasi a parità di spessore, generi maggior impatto la produzione di un m<sup>2</sup> di pannello isolante termico in polistirene rispetto a quella di un m<sup>2</sup> di pannello in poliuretano.

La valutazione dell'involucro A è stata effettuata rispettivamente con i metodi EPS2000, Edip 96 e Edip 96 (*only resources*).

Con il metodo EPS il costo totale vale 300,5 ELU ed è dovuto alla somma del costo ambientale che è di 24,5 €, valore dato dalla sommatoria dei punti nell'istogramma, e del costo commerciale che è di 276 €. Il costo ambientale è dovuto per il -51,83% a *Human Health*, per il 63,67% a *Ecosystem Production Capacity*, per il 87% a *Abiotic Stock Resources*, per il 1,27% a *Biodiversity*.

Comparando gli esiti della valutazione LCA con i due metodi, non sono ovviamente confrontabili i punteggi finali, poiché ogni metodo è impostato su un approccio differente. Tuttavia è importante poter comparare l'andamento dei risultati e si nota una certa corrispondenza:

- la produzione del pannello in EPS risulta anche in tal caso più impattante di quella del poliuretano,
- il punteggio singolo di impatto ambientale dovuto alla produzione di un metro lineare del corrente in acciaio è due volte più impattante di un m<sup>2</sup> di tavole in cotto di spessore 4cm, con un peso notevolmente superiore al corrente in acciaio.

Rispetto agli esiti parziali con il metodo Ecoindicator 99, in tal caso non risulta altrettanto impattante la produzione dei pannelli di legno, ma nel pannello sandwich è marcatamente più impattante la produzione del pannello EPS, con grande peso sugli impatti dovuto al consumo di risorse (*Depletion of reserves*).

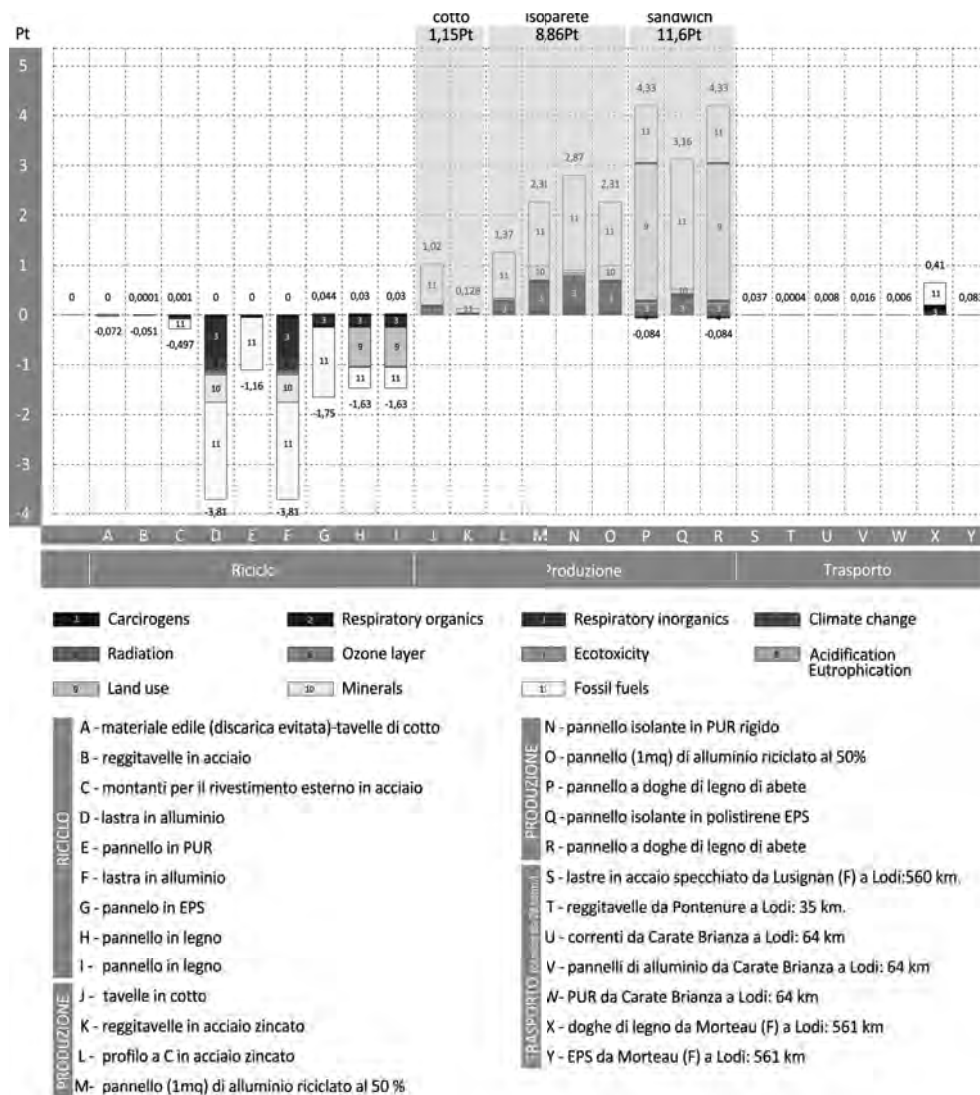


Fig. 5-7: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo Ecoindicator99.

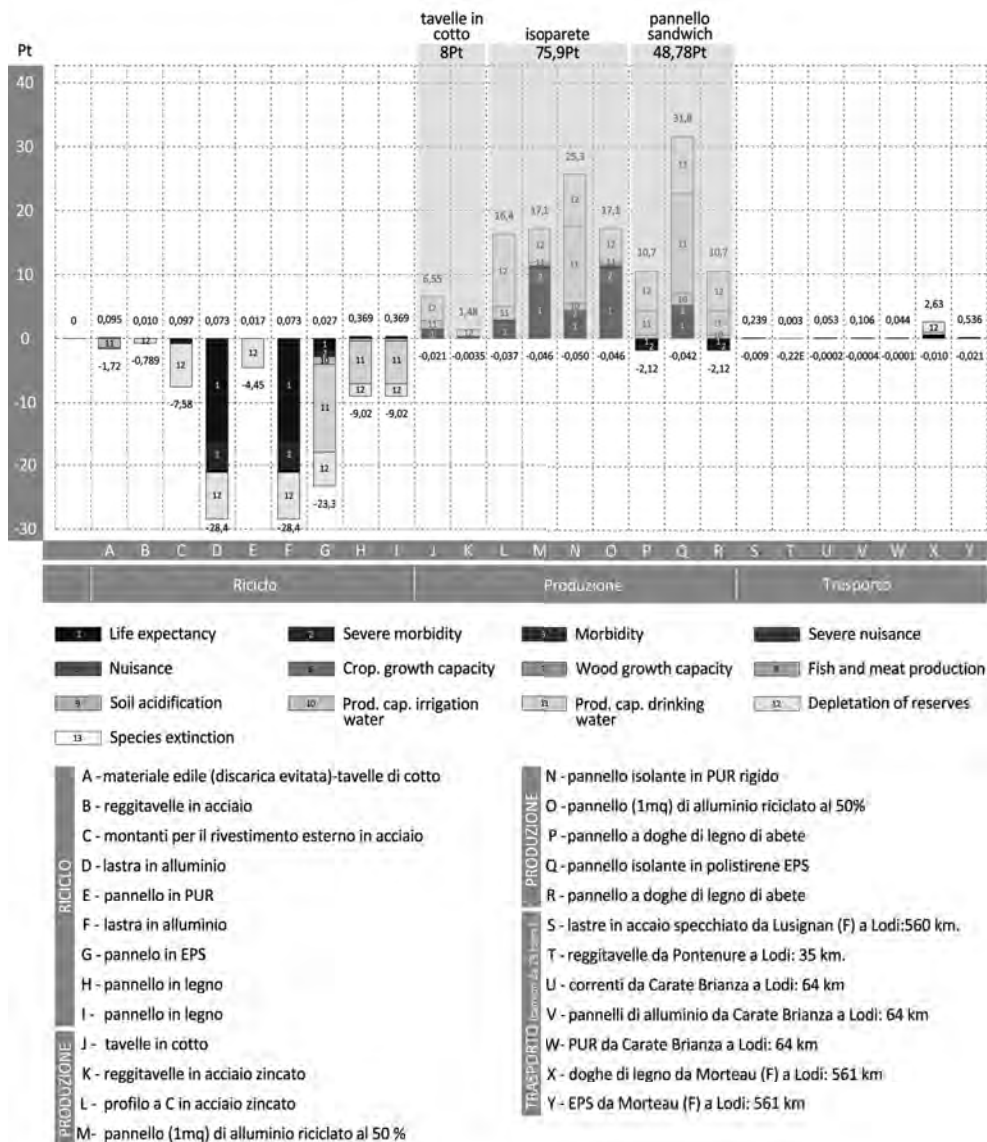


Fig. 5-8: Il diagramma di valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo EPS2000.



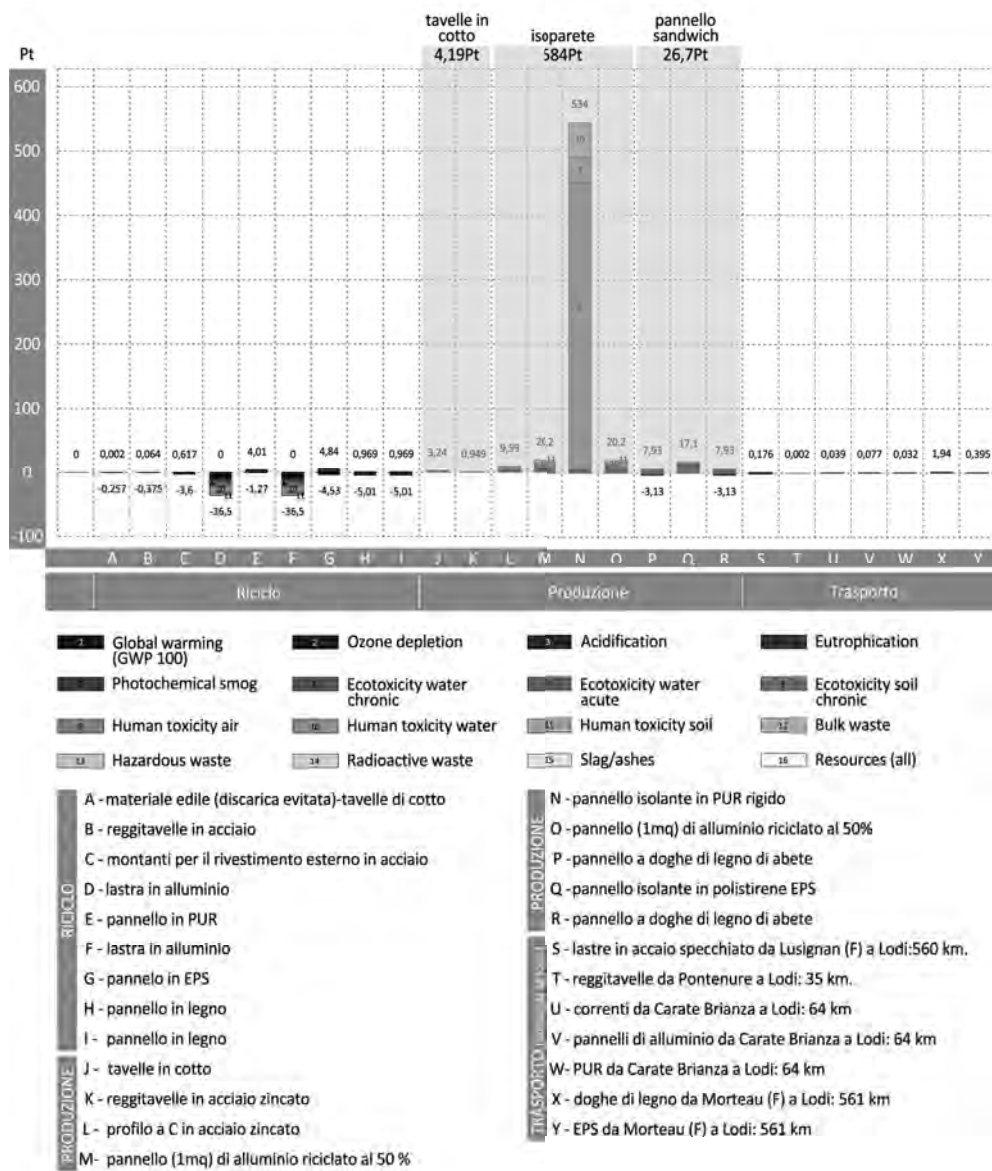


Fig. 5-9: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per il tipo d'involucro A con il metodo Edip96: il danno totale vale 536 Pt dovuto per il 99.63% a PUR rigid foam P; il danno è dovuto per il 82.64% a Ecotoxicity water chronic e per il 8.33% a Ecotoxicity water acute.

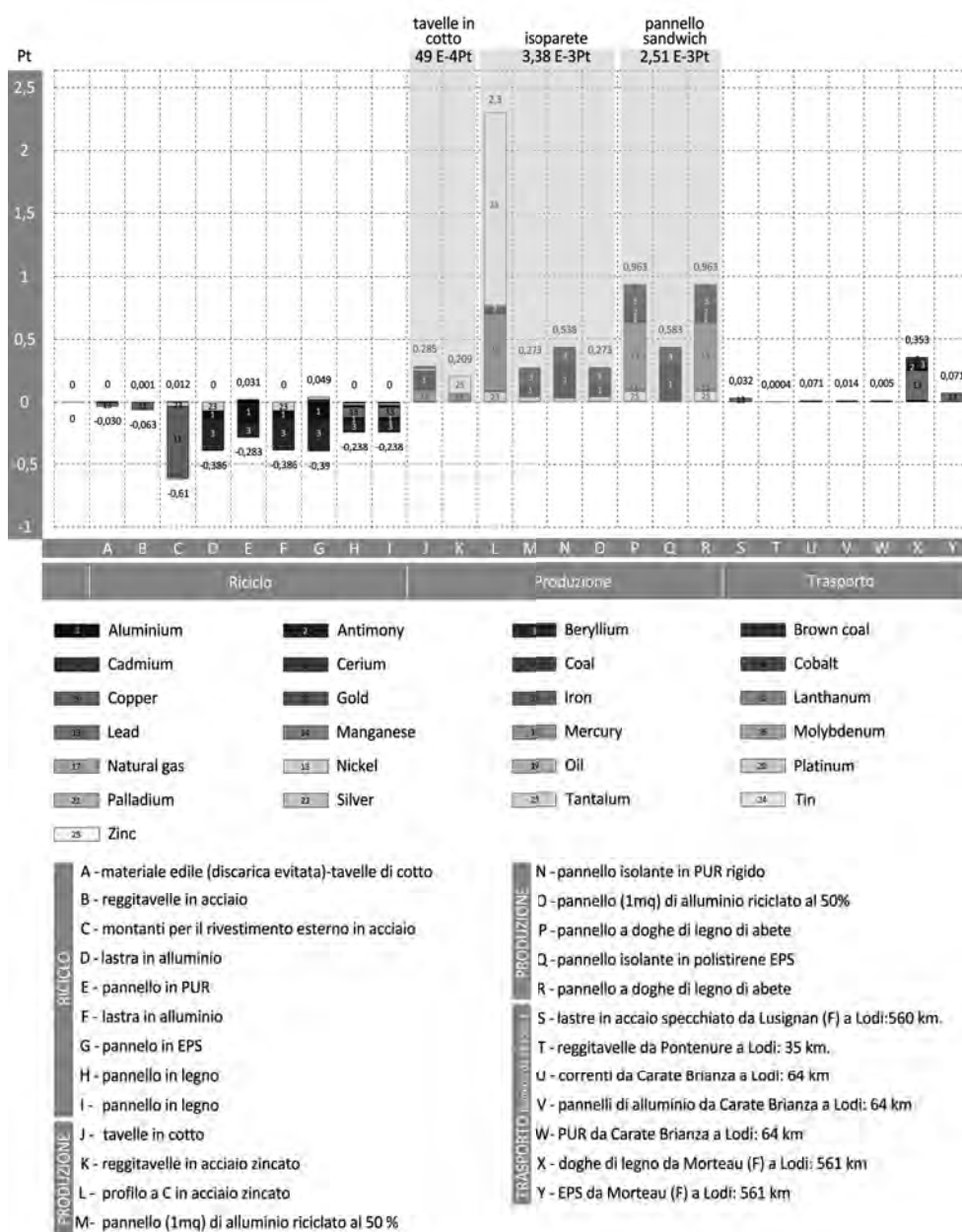


Fig. 5-10: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per l'involucro tipo A con il metodo Edip96 (only resources): il danno totale vale 0.00435 Pt dovuto per il 37,93% al consumo di Zinc (zinco), per il 28,96% al consumo di Lead (piombo) e per il 15,13% al consumo di Natural gas (gas naturale). Inoltre il danno totale è dovuto per il 52,87% a CM\_Profilo di acciaio zincato (produzione del profilo distanziatore per la posa del rivestimento esterno).

Per brevità si riportano i grafici delle valutazioni dei processi di produzione, trasporto e scenario di fine vita per gli involucri tipo B, tipo C, tipo D solo con il metodo EcoIndicator99.

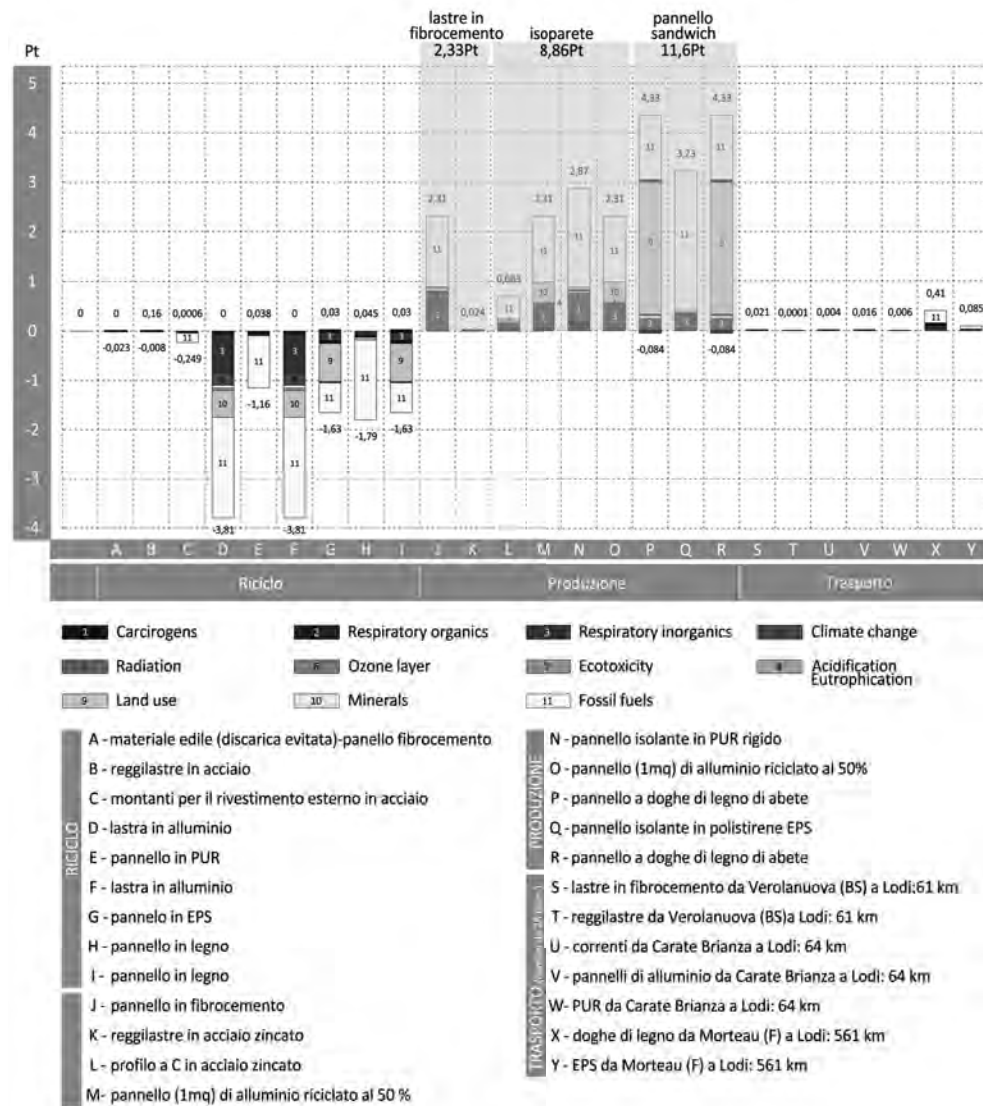


Fig. 5-11 Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per il tipo d'involucro B con il metodo EcoIndicator99.

La tipologia B differisce dalla prima per il rivestimento esterno in fibrocemento (1cm di spessore), la cui produzione provoca un impatto di 2,23Pt, rispetto a quella del rivestimento in tavole, che vale 1,15Pt, pur essendo queste in quantità maggiore per lo spessore di 4 cm.

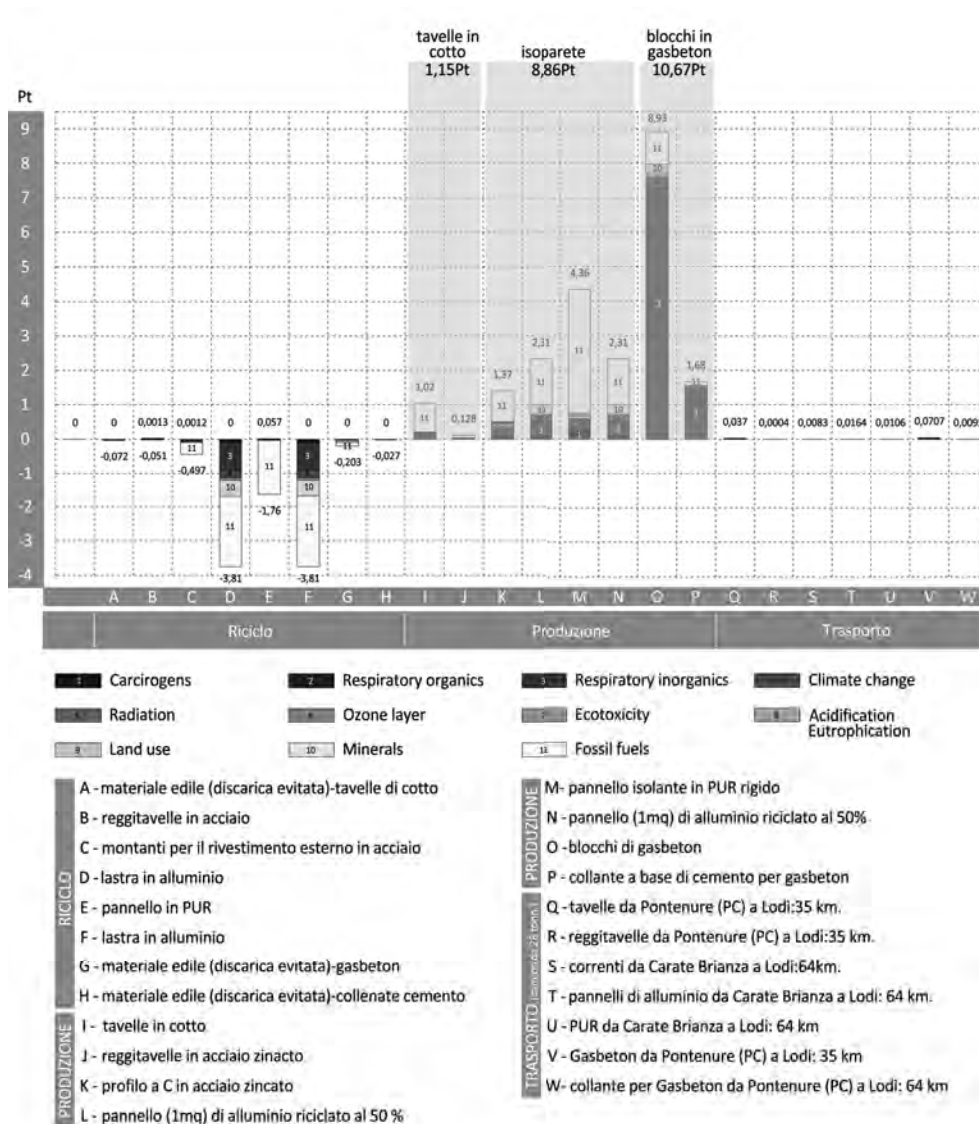


Fig. 5-12 Il diagramma della valutazione per (single score) del processo per il tipo d'involucro C con il metodo EcoIndicator99.

Per l'involucro C la produzione dei materiali è la fase del ciclo di maggiore incidenza, con 20,68 Pt di valutazione degli impatti, di cui il 51% del danno è imputabile alla produzione del calcestruzzo cellulare autoclavato, e in particolare alla realizzazione di blocchi, che determinano impatto per emissione di polveri. Lo strato resistente in gasbeton provoca un danno pari a 10,67 Pt, rispetto al pannello stratificato della soluzione A.

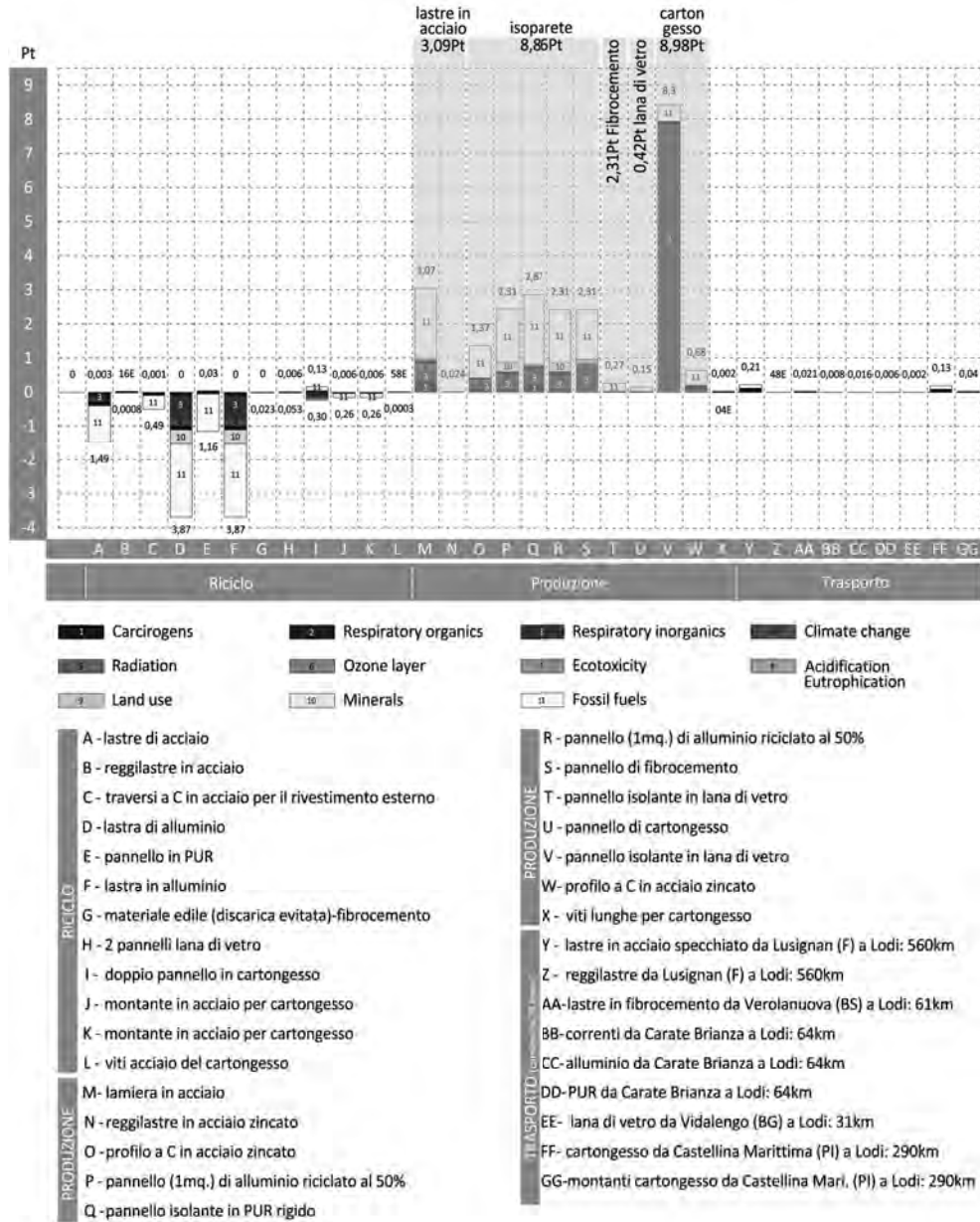


Fig. 5-13 Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) del processo per il tipo d'involucro D con il metodo EcoIndicator99.

Anche nel caso dell'involucro D la produzione dei materiali, è la fase del ciclo di maggiore incidenza, con 23,68 Pt di valutazione degli impatti, di cui il 38% del danno è imputabile alla produzione del sistema della parete in cartongesso, e in particolare alla realizzazione

del pannello in cartongesso, che, attraverso l'emissione di polveri, provoca danni alla salute umana. Complessivamente, sommando i risultati parziali, il componente della parete che provoca maggiori danni ambientali è il sistema parete in cartongesso, con le lastre e i montanti, con 8,98 Pt. La produzione di un pannello in lana di vetro implica un impatto molto inferiore a quella dei pannelli isolanti termici in EPS e in poliuretano (non solo grazie allo spessore leggermente inferiore, quindi a un peso inferiore) (0,42Pt *versus* i 2,31Pt PUR e i 3,23 dell'EPS).

#### 5.3.4.2. Analisi di confronto tra i processi del ciclo di vita delle quattro tipologie d' involucro

Questa analisi è di tipo comparativo e mette a confronto quattro tipologie di involucro. Dal confronto emerge la tipologia con una prestazione ambientale ottimale rispetto alle altre e si evince come complessivamente la chiusura verticale di tipo A sia la più eco-efficiente dal punto di vista degli impatti ambientali rispetto ai confini del sistema fin qui considerati.

I componenti e i prodotti delle tipologie sperimentali valutate hanno alto contenuto energetico, offrendo, attraverso il riciclaggio a fine vita, grandi potenzialità per una riduzione degli impatti e del consumo di risorse primarie, in un'ottica di sostenibilità a lungo termine; gli isolanti scelti utilizzano quantità di risorse non rinnovabili e nella produzione rilasciano sostanze nocive all'ecosistema e all'uomo; richiedono notevoli quantità di energie, con le relative emissioni, per essere prodotti, ma allargando i confini alla fase operativa, grazie alle loro proprietà di isolamento termico, possono offrire un contributo positivo in termini di risparmio energetico per la climatizzazione dell'edificio.

Categorie d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_InvD (Ud=Ua)
<b>ECO-INDICATOR 99</b>					
<b>Human health</b>	<b>(DALY)</b>	2,19E-05	4,65E-05	4,46E-04	4,19E-04
<i>Carcinogens</i>	DALY	1,11E-05	9,74E-06	1,36E-05	1,36E-05
<i>Respiratory organics</i>	DALY	2,05E-07	3,22E-07	6,72E-08	1,92E-07
<i>Respiratory inorganics</i>	DALY	1,08E-05	3,51E-05	0,000418	0,000396
<i>Climate change</i>	DALY	-2,75E-07	1,34E-06	1,46E-05	9,43E-06
<i>Radiation</i>	DALY	1,21E-08	1,20E-08	3,24E-09	4,26E-09
<i>Ozone layer</i>	DALY	1,84E-08	1,62E-08	-8,95E-09	-3,55E-09
<b>Ecosystem quality</b>	<b>(PDF*m2yr)</b>	65,68	66,25	9,178	23,26
<i>Ecotoxicity</i>	PAF*m2yr	18,3	19,2	5,57	19
<i>Acidification/Eutrophication</i>	PDF*m2yr	2,65	3,03	2,95	2,46
<i>Land use</i>	PDF*m2yr	61,2	61,3	0,658	1,8
<b>Resources</b>	<b>(MJ surplus)</b>	57,14	62,41	38,96	56,03
<i>Minerals</i>	MJ surplus	-7,86	-8,09	-4,14	-7,47
<i>Fossil fuels</i>	MJ surplus	65	70,5	43,1	63,5
<i>Energia GER</i>	MJ	643	733	527	-272
<i>Costo</i>	Euro	276	146	228	251

Tab. 5-16: Caratterizzazione degli impatti ambientali con Eco-indicator99 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.

Categorie d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
ECO-INDICATOR 99		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_InvD (Ud=Ua)
<b>Human health (Pt)</b>		8,4	9,79	21,71	21,64
Carcinogens	Pt	0,238	0,21	0,293	0,293
Respiratory organics	Pt	0,00441	0,00693	0,00145	0,00415
Respiratory inorganics	Pt	0,233	0,757	9	8,54
Climate change	Pt	-0,00593	0,0289	0,316	0,203
Radiation	Pt	0,00026	0,000258	6,98E-05	9,18E-05
Ozone layer	Pt	0,000395	0,000349	-0,000193	-7,66E-05
<b>Ecosystem quality (Pt)</b>		4,261	4,301	0,2709	0,401
Ecotoxicity	Pt	0,119	0,124	0,0362	0,124
Acidification/ Eutrophication	Pt	0,172	0,197	0,192	0,16
Land use	Pt	3,97	3,98	0,0427	0,117
<b>Resources (Pt)</b>		3,2	3,487	2,178	3,132
Minerals	Pt	-0,44	-0,453	-0,232	-0,418
Fossil fuels	Pt	3,64	3,94	2,41	3,55
<b>Totale (Pt)</b>		7,93	8,79	12,1	12,6

Tab. 5-17: Valutazione degli impatti ambientali con Eco-indicator99 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.

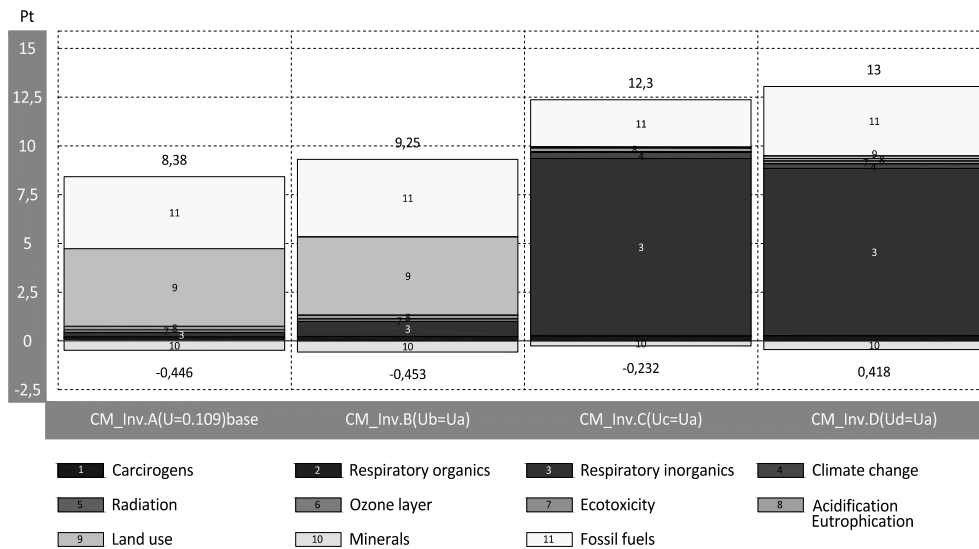


Fig. 5-14: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Ecoindicator 99.

Categoria d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
EPS 2000		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_InvD (Ud=Ua)
<b>Human health</b>	<b>(ELU/PersonYr)</b>	<b>-12,8</b>	<b>-9,85</b>	<b>35,3</b>	<b>27,6</b>
Life Expectancy	PersonYr	-0,000113	-8,16E-05	0,000416	0,000332
Severe Morbidity	PersonYr	-3,57E-05	-3,42E-05	-1,22E-05	-2,02E-05
Morbidity	PersonYr	-3,06E-07	6,22E-06	5,22E-05	3,52E-05
Severe Nuisance	PersonYr	3,51E-05	2,65E-05	1,84E-05	6,90E-05
Nuisance	PersonYr	0,000821	0,00178	0,00415	0,00352
<b>Ecosystem production capacity</b>	<b>(ELU/kg o H+)</b>	<b>15,6</b>	<b>14,9</b>	<b>26,2</b>	<b>22,6</b>
Crop Growth Capacity	kg	0,527	0,633	0,219	0,282
Wood Growth Capacity	kg	-4,66	-5,39	-3,96	-3,21
Fish and Meat production	kg	-0,00947	-0,014	-0,0106	-0,0133
Soil Acidification	H+ eq.	0,348	0,624	0,578	0,546
Prod. Cap. Irrigation Water	kg	476	455	798	687
Prod. Cap. Drinking water	kg	476	455	798	687
<b>Abiotic stock resources</b>	<b>[-]</b>	<b>21,4</b>	<b>20</b>	<b>13,9</b>	<b>18,6</b>
Depletion of reserves	ELU	21,4	20	13,9	18,6
<b>Biodiversity</b>	<b>(ELU)</b>	<b>0,312</b>	<b>0,342</b>	<b>0,0721</b>	<b>0,0843</b>
Species Extinction	NEX	2,84E-12	3,11E-12	6,56E-13	7,66E-13
Costo	Euro	276	146	228	251

Tab. 5-18: Caratterizzazione degli impatti ambientali con EPS2000 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.

Categorie d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
EPS 2000		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_InvD (Ud=Ua)
<b>Human health</b>	<b>(Pt)</b>	<b>-12,8</b>	<b>-9,85</b>	<b>35,3</b>	<b>27,6</b>
Life Expectancy	Pt	-9,63	-6,93	35,4	28,2
Severe Morbidity	Pt	-3,57	-3,42	-1,22	-2,02
Morbidity	Pt	-0,00306	0,0622	0,522	0,352
Severe Nuisance	Pt	0,351	0,265	0,184	0,69
Nuisance	Pt	0,0821	0,178	0,415	0,352
<b>Ecosystem production capacity</b>	<b>(Pt)</b>	<b>15,6</b>	<b>14,9</b>	<b>26,2</b>	<b>22,6</b>
Crop Growth Capacity	Pt	0,0791	0,0949	0,0329	0,0423
Wood Growth Capacity	Pt	-0,186	-0,215	-0,159	-0,129
Fish and Meat production	Pt	-0,00947	-0,014	-0,0106	-0,0133
Soil Acidification	Pt	0,00348	0,00624	0,00578	0,00546
Prod. Cap. Irrigation Water	Pt	1,43	1,36	2,39	2,06
Prod. Cap. Drinking water	Pt	14,3	13,6	23,9	20,6
<b>Abiotic stock resources</b>	<b>(Pt)</b>	<b>21,4</b>	<b>20</b>	<b>13,9</b>	<b>18,6</b>
Depletion of reserves	Pt	21,4	20	13,9	18,6
<b>Biodiversity</b>	<b>(Pt)</b>	<b>0,312</b>	<b>0,342</b>	<b>0,0721</b>	<b>0,0843</b>
Species Extinction	Pt	0,312	0,342	0,0721	0,0843
<b>Totale</b>	<b>(Pt)</b>	<b>24,5</b>	<b>25,4</b>	<b>75,5</b>	<b>68,8</b>

Tab. 5-19: Valutazione degli impatti ambientali con EPS2000 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.



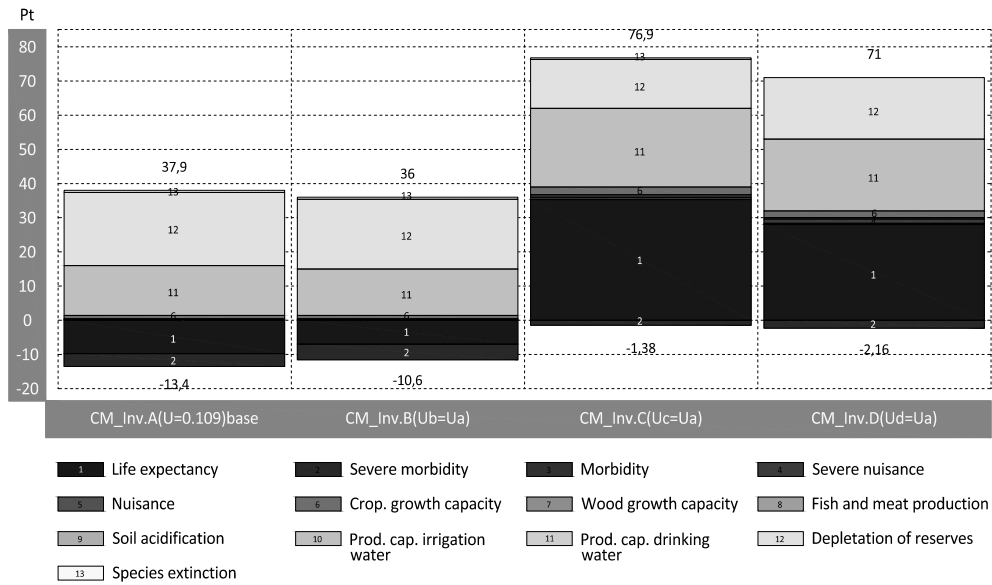


Fig. 5-15: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo EPS2000.

Categorie d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_Inv D (Ud=Ua)
<b>Edip 96</b>					
Global warming (GWP 100)	g CO2	1,14E+04	1,90E+04	8,28E+04	5,83E+04
Ozone depletion	g CFC11	0,0175	0,0154	-0,00852	-0,00338
Acidification	g SO2	225	403	367	346
Eutrophication	g NO3	329	515	343	476
Photochemical smog	g ethene	-17,3	-16	-6,67	-1,91
Ecotoxicity water chronic	m3	9,26E+06	9,28E+06	1,40E+07	9,27E+06
Ecotoxicity water acute	m3	9,33E+05	9,36E+05	1,41E+06	9,35E+05
Ecotoxicity soil chronic	m3	424	367	380	376
Human toxicity air	m3	-2,43E+08	-3,26E+08	-5,39E+08	-2,58E+08
Human toxicity water	m3	8,49E+05	8,37E+05	1,17E+06	8,31E+05
Human toxicity soil	m3	776	729	787	712
Bulk waste	kg	-44,2	-16,2	-174	-16,3
Hazardous waste	kg	0,0912	0,0888	0,0701	0,0355
Radioactive waste	kg	x	x	x	x
Slags/ashes	kg	0,667	0,419	0,742	1,26
Resources (all)	kg	0,00428	0,00339	0,00255	0,00399

Tab. 5-20: Caratterizzazione degli impatti ambientali con Edip96 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.

Categorie d'impatto	Unità	Impatti dei processi dal reperimento materie prime al cantiere e con la previsione del fine vita			
Edip96		CM_Inv A (U=0.109)	CM_Inv B (Ub=Ua)	CM_Inv C (Uc=Ua)	CM_InvD (Ud=Ua)
Global warming (GWP 100)	Pt	1,71	2,84	12,4	8,72
Ozone depletion	Pt	1,99	1,76	-0,971	-0,385
Acidification	Pt	2,36	4,22	3,85	3,63
Eutrophication	Pt	1,32	2,08	1,38	1,92
Photochemical smog	Pt	-1,04	-0,961	-0,4	-0,114
Ecotoxicity water chronic	Pt	443	444	669	444
Ecotoxicity water acute	Pt	44,6	44,8	67,7	44,8
Ecotoxicity soil chronic	Pt	0,0203	0,0176	0,0182	0,018
Human toxicity air	Pt	-0,0743	-0,0994	-0,165	-0,0786
Human toxicity water	Pt	35,9	35,3	49,3	35,1
Human toxicity soil	Pt	6,27	5,89	6,35	5,75
Bulk waste	Pt	-0,036	-0,0132	-0,142	-0,0133
Hazardous waste	Pt	0,00485	0,00472	0,00372	0,00189
Radioactive waste	Pt	x	x	x	X
Slags/ashes	Pt	0,0021	0,00132	0,00233	0,00397
Resources (all)	Pt	0	0	0	0
Totale	Pt	536	540	809	543

Tab. 5-21: Valutazione degli impatti ambientali con Edip96 delle quattro tipologie di chiusura perimetrale verticale.

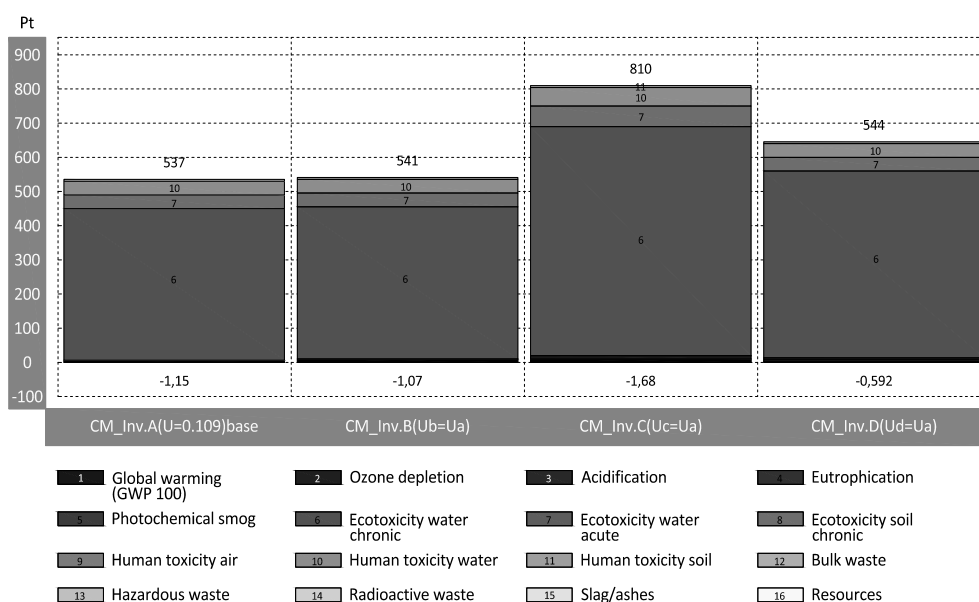


Fig. 5-16: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Edip96.

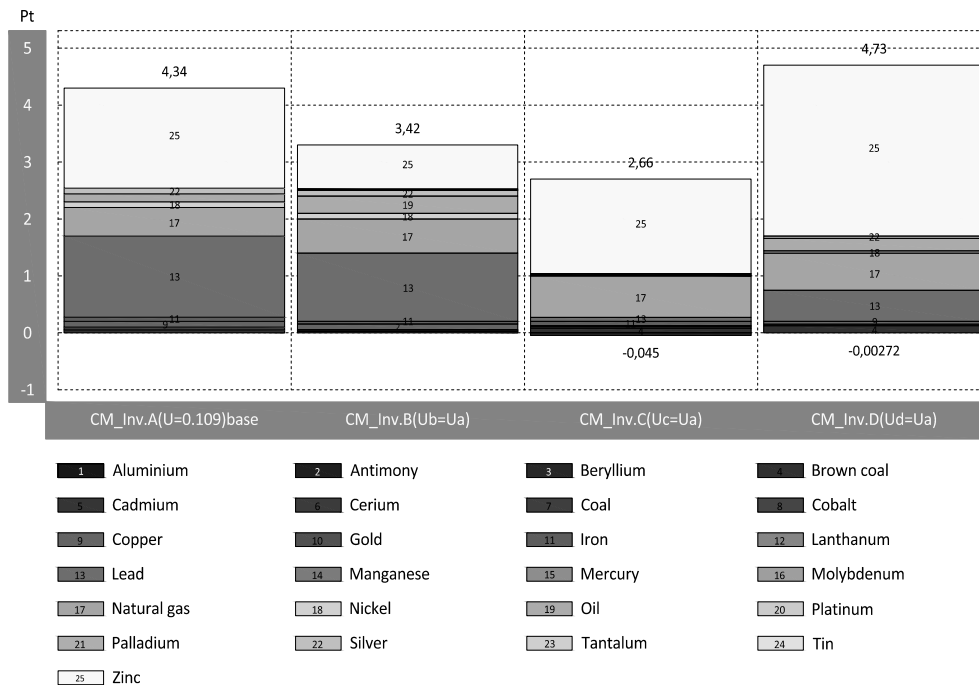


Fig. 5-17: Risultati con punteggio singolo della LCA comparativa fra i quattro tipi di involucro, svolta con il metodo Edip96 (only resources).

#### 5.4. LCA alla scala dell'edificio

Tale sezione della valutazione, dedicata all'edificio, prende in considerazione: - la produzione dell'involucro e lo scenario di fine vita (il riciclaggio); - la produzione del solaio contro terra e del solaio di copertura con lo scenario di fine vita di riciclo dei materiali; - la produzione dei serramenti e i relativi scenari di fine vita; - l'occupazione del suolo da parte dell'edificio; - l'utilizzo di un impianto di riscaldamento a gas metano, quindi il computo del consumo energetico per la climatizzazione invernale.

##### 5.4.1. Il sistema, i confini del sistema e la definizione dell'obiettivo dell'analisi

L'analisi contempla le fasi dal reperimento delle materie prime per i materiali costituenti l'edificio fino al fine vita, considerando 25 anni di vita utile (*service life*) dell'edificio e di durata dei suoi subsistemi. Per poter effettuare l'analisi del ciclo di vita complessiva è stato redatto un inventario comprendente la fase costruttiva, con tutti i processi di produzione di materiali e componenti a monte, l'impianto di riscaldamento, per assicurare il mantenimento delle condizioni termiche interne secondo la normativa, e l'occupazione del suolo per l'arco di tempo definito di 25 anni.

Allargando i confini oltre la fase di produzione e trasporto al cantiere, si è effettuata una valutazione ambientale (impatti ambientali in fase di produzione, in fase d'uso e fine vita)

dell'intero involucro della parte del complesso edilizio di Lodi, con funzione residenziale: il complesso di Lodi è costituito da più corpi di fabbrica, ma nell'analisi seguente si è considerato il corpo adibito a residenza.

L'obiettivo è l'analisi del comportamento ambientale dell'edificio, quindi un confronto degli impatti fra la fase di produzione dei materiali e la fase d'uso, attraverso i consumi energetici dell'edificio. Per la quantificazione dei consumi complessivi dell'edificio, dell'energia necessaria al riscaldamento, si è utilizzato un *software* di calcolo di verifica del fabbisogno energetico dell'edificio, considerando le dispersioni dovute all'involucro opaco e trasparente, alla ventilazione e agli apporti gratuiti delle finestre e dei carichi interni. Si è tenuto conto dei rendimenti degli impianti, trovando un valore, prodotto di quattro rendimenti, di  $\eta=0,766$ . Si sono trascurati i consumi relativi all'illuminazione e alla produzione di acqua calda sanitaria.

#### **5.4.2. Unità funzionale e definizione dei flussi di riferimento della fase di costruzione**

L'unità funzionale, in questo caso, è costituita dai  $m^2$  di superficie utile interna e dall'arco temporale di vita dell'edificio considerato è di 25 anni (stima della durabilità dei componenti dell'involucro leggero). La superficie utile interna è  $505 m^2$ , somma della superficie utile del piano terra ( $258 m^2$ ) e di quella del piano primo ( $247 m^2$ ). Il fattore di forma è 0,584 S/V. Il volume dell'edificio equivale a  $1968,77 m^3$  e le superfici totali disperdenti, comprensive di chiusure verticali, copertura e solaio controterra, sono di  $1150,35 m^2$ , così ripartite: a. superficie delle chiusure verticali opache =  $568 m^2$ , b. superficie delle chiusure verticali trasparenti =  $105 m^2$ , c. superficie della copertura =  $324 m^2$ , c. superficie del solaio controterra =  $305 m^2$ .

#### **5.4.3. Analisi dell'inventario**

Per poter effettuare l'analisi del ciclo di vita complessiva è stato computato un inventario che comprendesse i subsistemi dell'edificio, con a monte tutti i processi di produzione di materiali e componenti, gli impianti e l'uso del suolo per l'arco di tempo definito.

Per i subsistemi seguenti si sono costruiti i processi per i materiali e componenti coinvolti, compresi i trasporti al cantiere e lo scenario di fine vita. I processi si riferiscono alla superficie totale dei subsistemi a cui si riferiscono: sono stati creati prima con l'unità funzionale di un  $m^2$  e nell'LCA della costruzione totale sono stati richiamati per il numero di  $m^2$  totale.

I risultati delle analisi sono stati divisi per  $505$ , valore dei  $m^2$  di Su, per ottenere gli impatti/ $m^2$ .

- Chiusura verticale esterna opaca: E' stata adottata la tipologia di chiusura verticale A, con la trasmittanza di  $0,109 W/m^2K$ , lo spessore di  $37,4 cm$ , di cui  $25 cm$  costituito da isolante. Nella costruzione della LCA per la costruzione si è richiamata la voce CM\_InvA, precedentemente dettagliata, e si è associato ad essa il valore di  $568 p$ , poiché il codice di calcolo nella valutazione moltiplica il processo di un  $m^2$  per i  $m^2$  totali delle superfici disperdenti opache. Nel nostro caso i  $m^2$  sono  $568$ .
- Chiusura verticale esterna trasparente: per le chiusure verticali trasparenti si è fatta un'analisi del ciclo di vita di serramenti in legno verniciato e vetrocamera di spessore  $2,38 cm$  ( $4-15,8-4 mm$ ), assicurando una trasmittanza di  $2,4 W/m^2K$ , soddisfacendo i limiti imposti dal D.L n.192. Le superfici disperdenti sono state computate per il bilancio energetico. Si è condotta una analisi LCA dell'edificio, comprendendo i processi "dalla

culla al cantiere” dei serramenti (per la superficie prevista nel progetto), e la loro incidenza è risultata dell’1% sul totale degli impatti del ciclo di vita dell’edificio. Nelle valutazioni successive si è deciso di omettere questi processi.

- Chiusura orizzontale - solaio di copertura: la chiusura orizzontale per la copertura è di tipo leggero ed assemblata a secco, come il resto del sistema costruttivo. Si è impostato il processo per un’unità di superficie e poi nella LCA dell’edificio è stata moltiplicata per i m<sup>2</sup> di superficie coperta. Il solaio di copertura ha uno spessore totale di 49 cm, di cui 35 cm di isolante in polistirene. La trasmittanza della copertura è pari a 0,09 W/m<sup>2</sup>K.

Definizione*	Descrizione
CM_Solaio di Cop. F	<b>Solaio di copertura *:</b> 1. membrana impermeabilizzante 2. lastra di polistirene 3. calcestruzzo armato 4. lastra di polistirene 5. pannello in legno di abete <b>Spessore</b> cm 49 <b>Trasmittanza</b> 0,09 W/m <sup>2</sup> K

\* Nell’ordine di successione dall’interno verso l’esterno.

Tab. 5-22: Caratteristiche degli strati dei componenti costituenti la soluzione del solaio di copertura F.

- Solaio contro terra: comprende in questo caso le fondazioni, costituite da una platea di fondazione in cls. armato; escluso il getto per la platea e quello di completamento sopra il vespaio aerato in elementi tridimensionali in materiale plastico, gli altri strati del pavimento sono assemblati a secco come il resto del sistema. Si è impostato il processo per un’unità di superficie e poi, nella analisi dell’edificio, è stato moltiplicato per i m<sup>2</sup> di superficie contro terra. Il solaio contro terra, compreso di platea, ha uno spessore totale di 1,09 m. La trasmittanza è pari a 0,39 W/m<sup>2</sup>K.

Definizione*	Descrizione
CM_Solaio Contoterra E	<b>Solaio contro terra *:</b> 1. piastrelle in gres 2. pavilastre a secco 3. sabbia essiccata a secco 4. lastra di polistirene 5. vespaio areato con getto in cls.armato 6. calcestruzzo armato 7. strato drenante con ghiaia <b>Spessore</b> cm 1,09 <b>Trasmittanza</b> 0,39 W/m <sup>2</sup> K

\* Nell’ordine di successione dall’interno verso l’esterno.

Tab. 5-23: Caratteristiche degli strati dei componenti costituenti la soluzione del solaio controterra E.

Per definire l'inventario della fase d'uso ed andare a valutare successivamente gli impatti per la climatizzazione invernale, ai fini di contrastare le dispersioni termiche delle superfici esterne dell'edificio, si sono calcolati: a. la quantità di calore  $Q_{pr}$  (energia primaria) richiesta da un impianto di riscaldamento termico per mantenere le condizioni di comfort interno all'edificio, in condizioni invernali a Lodi, nell'arco di 25 anni; b. un valore di uso del suolo.

Per la fase di gestione si sono costruiti i processi per l'analisi del ciclo della climatizzazione invernale dell'edificio; non sono stati presi in considerazione i processi del consumo di acqua calda ad uso sanitario dell'edificio; non sono stati presi in considerazione i processi del consumo elettrico.

Per ogni sottoprocesso è stato indicato il flusso di riferimento. Per il calcolo dei consumi energetici (energia primaria e F.E.P.) si riportano i risultati dell'analisi di quantificazione del fabbisogno energetico annuo, risultato del bilancio energetico dell'edificio. Il valore di energia primaria è  $Q_{pr} = 67.498$  MJ/anno e viene inserito nel processo dell'analisi del ciclo di vita dell'edificio, nel codice SimaPro, come energia termica richiesta dalla caldaia a gas. Nel processo della fase d'uso si è inserita la voce caldaia a gas (*Heat gas*), presa da banca dati, per identificare l'impianto di riscaldamento. A tale voce si è fatta corrispondere la quantità di energia richiesta dall'edificio. La voce relativa all'impianto contempla anche i processi per la fabbricazione dello stesso.

Grandezza	Valore	Grandezza	Valore
Potenza dell'edificio	15.985 [kW]	Q primaria/mq Su.	37 [kWh/mq anno]
Fabbisogno di energia primaria	67.489 [MJ/anno] 18.747 [kWh/anno]	Q primaria per 25 anni	1.687.225 [MJ]

Tab. 5-24: Risultati delle verifiche con l'inserimento di una caldaia a gas come impianto di riscaldamento.

Fabbisogno di energia primaria	67.489 [MJ/anno]	Q primaria/mq Su.	29 [kWh/mq anno] vs 37
	18.747 [kWh/anno]		
	52.758 [MJ/anno]	Q primaria per 25 anni	1.318.950 [MJ]
	14.655 [kWh/anno]		

Tab. 5-25: Confronto dei fabbisogni energetici fra la caldaia a gas e la pompa di calore come impianto di riscaldamento.

Come si può notare dai risultati:

- la potenza dell'edificio, ovvero il bilancio fra la trasmissione con l'ambiente esterno, con il terreno, la ventilazione, gli apporti interni, gli apporti solari interni, gli apporti solari esterni, ammonta a 15.985 kW;
- la caldaia a gas, nelle condizioni tipiche dell'edificio a Lodi, ha un F.E.P. di 18.747 kWh all'anno, e in particolare 37 kWh/m<sup>2</sup> all'anno, mentre la pompa di calore permette un risparmio energetico, richiedendo 29 kWh/m<sup>2</sup> all'anno.

Un'ultima precisazione è da fare relativamente al valore dei MJ sopra riportati: per la pompa di calore i MJ sono di tipo elettrico, mentre i valori ottenuti dalla simulazione energetica si riferiscono a MJ termici. Nel momento in cui il valore di  $Q_{pr}$  viene riportato nel

codice di calcolo per la valutazione eventuale di un LCA dell'edificio, non condotta in questa ricerca, i MJ termici della pompa di calore vanno computati in MJ elettrici. Questa operazione consiste nel moltiplicare il valore termico per il fattore 0,36, per ottenere il valore elettrico. Il fattore 0,36 consiste nel rendimento del Servizio Energetico Nazionale  $\eta_{S.E.N.}$ , prodotto del  $\eta$  di produzione alla centrale elettrica \*  $\eta$  di rete.

Nella costruzione dell'inventario si sono richiamate le voci relative all'uso del suolo da parte dell'edificio e si è fatto un calcolo dell'occupazione del suolo da parte dell'edificio, rispetto al lotto, e da parete della zona a verde che lo circonda, sempre nel lotto di pertinenza. E' stata computata l'occupazione del suolo come territorio urbano costruito. Nel caso particolare del lotto di Lodi e del progetto in particolare si sono considerati:

- Area del lotto:  $A = 2294\text{m}^2$
- Superficie coperta:  $S = 553,5\text{m}^2$  (25% della area tot. del lotto)
- Area della superficie libera:  $SL = 1740,5\text{m}^2$
- Area (approssimata) totale delle superfici, interne e esterne, dell'edificio =  $3420\text{m}^2$
- Uso del suolo:  $(553,5\text{m}^2 * 25a / 3420\text{m}^2) * 1\text{m}^2 = 4,05\text{m}^2a$   
 $[\text{Sup coperta} * \text{anni di occupazione} / \text{Sup tot(I e E) delle superfici}] * \text{sup } 1\text{m}^2$
- Relativamente all'occupazione del suolo come territorio di verde urbano:
- Land use:  $(1740,5\text{m}^2 * 25a / 3420\text{m}^2) * 1\text{m}^2 = 12,72\text{m}^2a$   
 $[\text{Sup libera} * \text{anni di occupazione} / \text{Sup tot(I e E) superfici}] * \text{sup } 1\text{m}^2$

#### 5.4.4. Valutazione ambientale e interpretazione dei risultati

Definiti tutti i processi, sopra descritti, si passa alla fase di valutazione della analisi del ciclo di vita completo dell'edificio, con la quantificazione del danno ambientale. Dall'analisi della valutazione si nota che:

- il danno totale vale 26829 Pt dovuti per il 30% a *Human Health*, per il 16,95% a *Ecosystem Quality* e per il 53,05% a *Resources*
- inoltre il danno è dovuto per il 41,67% al processo di realizzazione del *solaio controterra* E ( $k=0,39$ ), per il 34,11% alla fase d'uso dell'edificio (processo *CM\_caldaia*) e per il 16,85% al processo di realizzazione dell' *involucro A* ( $k=0,109$ ).

La categoria di danno che è decisamente compromessa è quella delle risorse: del danno complessivo il 53,05% è dovuto all'uso di risorse e combustibili (il colore viola rappresenta la categoria *Resources*: tra queste il gas naturale per il riscaldamento).

Su uno scenario di vita utile di 25 anni nel caso specifico emerge come la scelta di soluzioni costruttive, altamente performanti dal punto di dell'isolamento termico (il comportamento termico dell'edificio è assimilabile a quello di una Passiv Haus), incida sugli impatti ambientali complessivi in modo considerevole. In questo scenario di vita utile, la fase pre-uso ha un'incidenza sugli impatti ambientali quasi doppia di quella della fase d'uso. Per cui si può affermare che se realmente la vita utile di un edificio simile fosse di 25 anni, tali scelte di soluzioni costruttive, costituite da ingenti spessori di materiali ad alto contenuto energetico e impatto ambientale, possono essere considerate eco-efficienti solo nel caso di una reversibilità completa dell'edificio e di riuso e riciclo dei componenti, al fine di "ammortizzare" gli impatti ambientali iniziali in più cicli di vita.

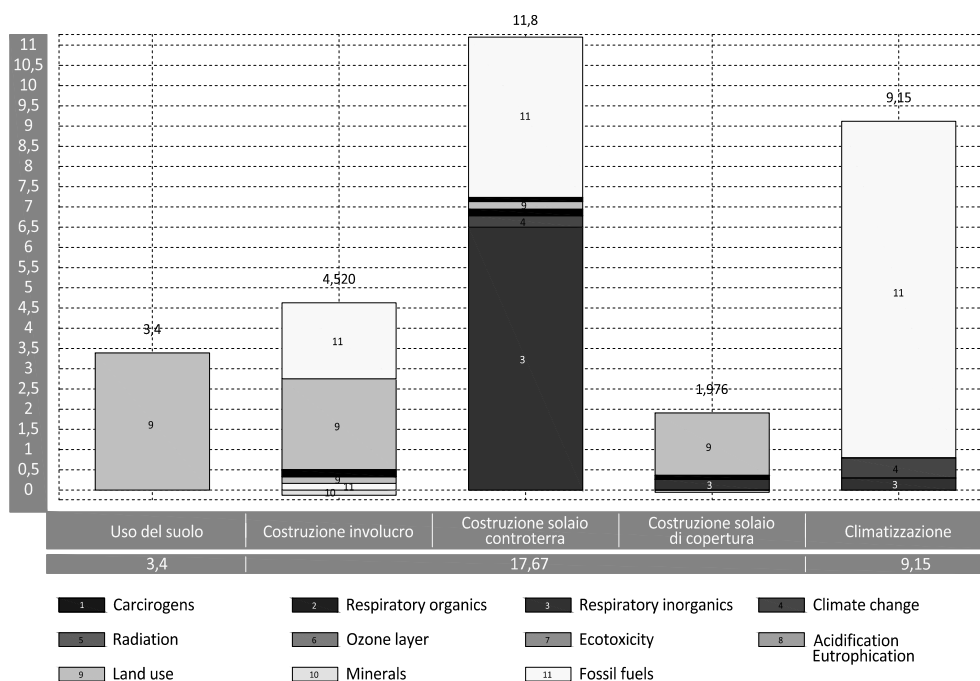


Fig. 5-18: Il diagramma della valutazione per punteggio singolo (single score) con il metodo Eco-indicator99 degli impatti relativi all'intero ciclo di vita dell'edificio per un periodo di 25 anni.

#### 5.4.5. Confronto di differenti fasi di gestione e manutenzione

Sono stati impostati per ipotesi alcuni scenari di riferimento, in cui si prevedono delle 'tappe' nel *service life* del manufatto, per la sostituzione dei componenti dell'involucro e della chiusura verticale. Gli *step* sono ogni 25 anni con un allargamento del *functional & service life* complessivo dell'edificio a 75 anni. E' chiara la natura teorica di questa indagine. Si tratta di una simulazione, poiché nella realtà le variabili sono innumerevoli e di difficile definizione preliminare. Gli archi temporali intermedi si riferiscono all'ipotetica durata dei materiali e componenti del manufatto edilizio. Le valutazioni degli scenari di gestione e manutenzione sono state fatte con il metodo Ecoindicator99, quindi le figure 5-19 e 5-20 sono da confrontare con la figura 5-18, che rappresenta la valutazione per i primi 25 anni. Nell'arco della prima fase d'uso (così possiamo chiamarla) gli impatti complessivi sono quantificati con 17,67 punti per le fasi a monte della *service life*, equivalenti alla somma dei valori relativi ai primi tre istogrammi del grafico di figura 5-18, e 9,15 per la fase d'uso dell'edificio, equivalente al quarto istogramma del grafico.

##### - Vita utile di 50 anni

Al venticinquesimo anno di vita si sono ipotizzate come attività di manutenzione la rimozione e la sostituzione dell'involucro e della copertura.

L'impatto del solaio contro terra è ovviamente invariato: lo si può interpretare come un



grande impatto iniziale o come un impatto iniziale “ammortizzabile” nel tempo, visto che non incrementa per motivi scontati. L’impatto della fase d’uso duplica per i 50 anni rispetto al primo *step*. Gli impatti della costruzione dell’involucro e della copertura raddoppiano, ma tali impatti vanno distribuiti fra la fase di produzione – costruzione e la fase di gestione dell’edificio.

Quindi la fase di costruzione rimane invariata con 17,67 Pt, la fase di gestione corrisponde a un impatto per 6,5 Pt e la fase d’uso a 18,3Pt.

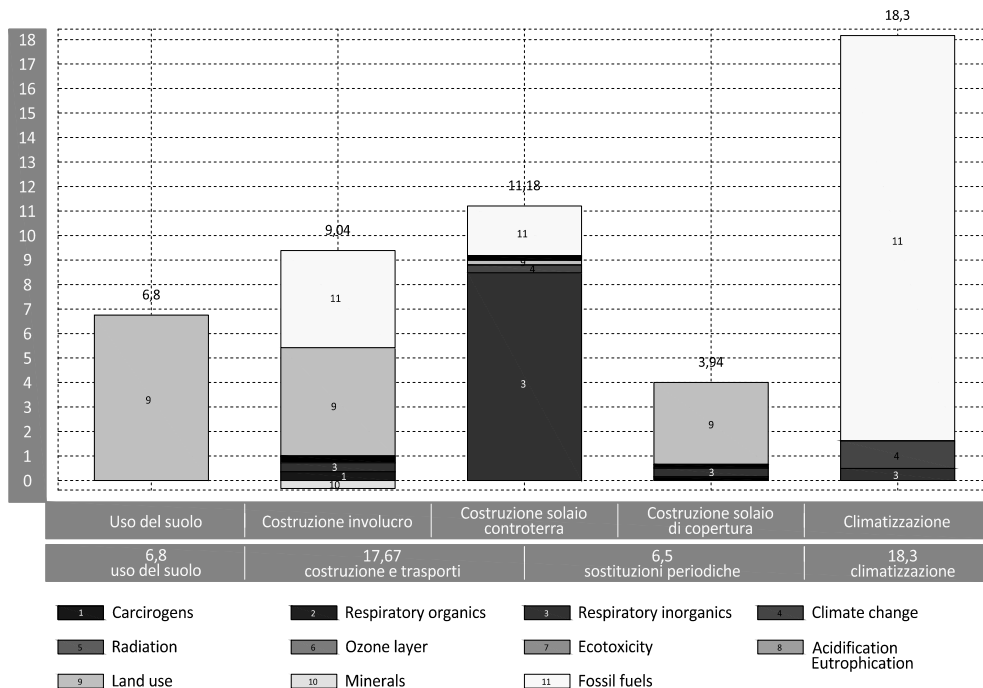


Fig. 5-19: Il diagramma della valutazione con il metodo Ecoindicator99 dell’LCA dell’edificio per un ciclo di vita (service life) di 50 anni.

#### - Vita utile di 75 anni

Al cinquantesimo anno si è ipotizzato un secondo ciclo di rimozione e sostituzione dell’involucro e della copertura. Dopo l’analisi del ciclo di vita per i 75 anni complessivi, con le due manutenzioni straordinarie intermedie, i risultati si presentano con i seguenti valori: l’impatto del solaio controterra è ovviamente invariato; l’impatto della fase d’uso triplica per i 75 anni; gli impatti della costruzione dell’involucro e della copertura incidono tre volte rispetto al primo *step*, ma tali impatti vanno distribuiti fra la fase di produzione – costruzione e la fase di gestione dell’edificio.

Quindi la fase di costruzione rimane invariata con 17,67 Pt, la fase di gestione ha un impatto per 13 Pt e la fase d’uso a 27,45Pt.

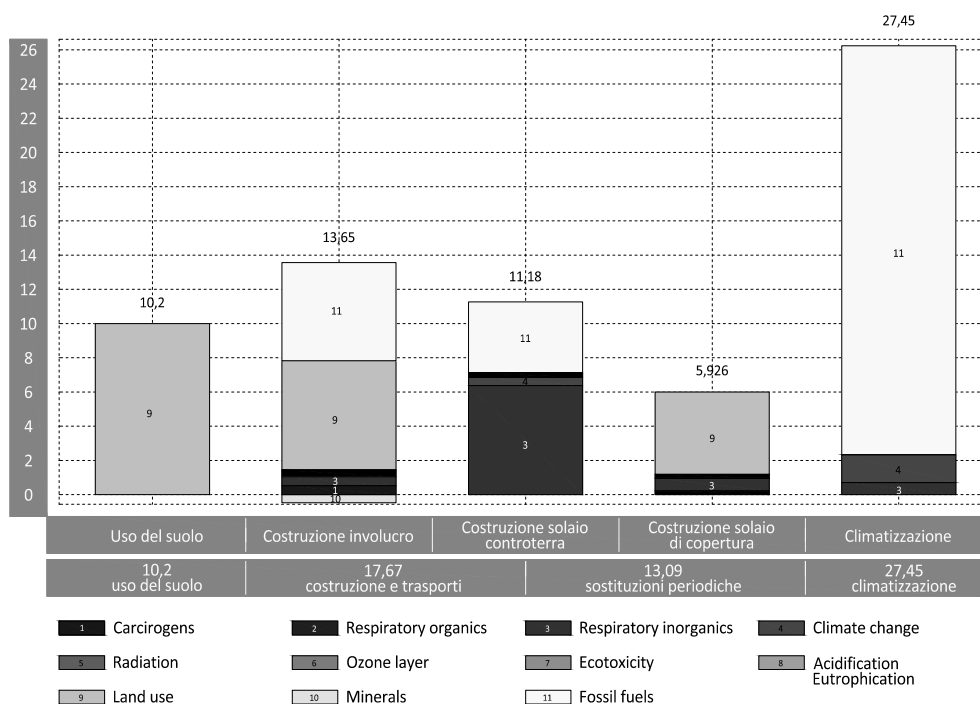


Fig. 5-20: Il diagramma della valutazione con il metodo Ecoindicator99 dell'LCA dell'edificio per un ciclo di vita (service life) di 75 anni

L'obiettivo raggiunto con le analisi illustrate è stata la verifica dell'efficienza del tipo di involucro scelto e della maggior incidenza fra fase di produzione dei componenti o la fase d'uso con un preciso valore di trasmittanza termica  $U$ , da cui è risultato, in questo specifico caso e per lo scenario temporale di 25 anni, che tutti i processi a monte della fase di gestione dell'edificio (dal reperimento materie prime al cantiere) determinano un maggior impatto sull'equilibrio dell'edificio con l'ambiente rispetto alla sola fase di gestione dell'edificio, con gli impatti dovuti al consumo di combustibile per la climatizzazione. Questi risultati variano se si considera un arco di tempo di 50 e 75 anni. Gli impatti della fase di costruzione rimangono invariati, mentre quelli della fase di gestione aumentano, non solo per un consumo di combustibile 'doppio', nel primo scenario, e 'triplo' nel secondo scenario, ma anche per gli impatti dovuti alla produzione di nuovi componenti per l'involucro e per la copertura. In questi scenari la fase di gestione risulta decisamente più impattante.

Complessivamente, se l'edificio ha una durata di vita più ampia, gli impatti iniziali per la produzione di materiali e componenti impattanti, sono bilanciati durante la fase d'uso. Infatti se si rimanesse sul primo scenario, bisognerebbe rivedere la scelta dei componenti per la realizzazione dell'edificio, non dimenticando le elevate prestazioni richieste ai fini di un bassissimo consumo in fase d'uso.

### 5.5. Il valore minimo degli impatti ambientali di costruzione gestione dell'edificio

Obiettivo di questa ultima parte è la verifica del minimo impatto dall'eco-bilancio dei consumi di materia e di energia nel *service life* di un edificio, attraverso una valutazione ambientale ed energetica della fase di produzione – costruzione e della fase d'uso, con la variazione dello spessore delle pareti in analisi e, quindi, del relativo fabbisogno energetico annuo. In altre parole la somma fra gli impatti della fase di costruzione e della fase d'uso deve risultare minima. Si è condotta una valutazione complessiva con questa ipotesi: potrebbe sussistere il caso in cui un mq di involucro con la miglior *performance*, dal punto di vista degli impatti ambientali della fase della sua realizzazione e dei suoi componenti, se integrato nella vita di un edificio, manifesti effetti differenti. Ovvero potrebbe succedere che la somma minima non si ottenga proprio con le prestazioni di trasmittanza termica scelte in fase di progetto e con la soluzione di involucro scelta (quella con il minore impatto ambientale).

#### 5.5.1. Variazione dello spessore di isolante nelle tipologie di chiusura verticale e valutazioni LCA

Si è definita una casistica di quattro valori di trasmittanza termica, definiti arbitrariamente. Ad ogni valore di trasmittanza sono stati modificati gli spessori delle soluzioni d'involucro di tipo A, B, C, D, nello specifico gli spessori dei materiali isolanti.

Di conseguenza i quattro valori di trasmittanza, per ogni tipo di chiusura verticale, presentato 16 soluzioni differenti. I valori delle trasmittanze sono espressi dal minore al maggiore, quindi da un isolamento maggiore a una performance della parete inferiore e hanno i seguenti valori:

- $U = 0,06 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  – questo viene considerato il valore di riferimento definito “valore base”
- $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- $U = 0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Dopo la redazione della casistica e le opportune modifiche alle chiusure verticali opache, si sono effettuate le analisi del ciclo di vita dell'edificio, una per ogni singolo caso dei sedici, nell'unità temporale di 25 anni.

I confini del sistema sono stati mantenuti invariati. Ogni analisi ha comportato, per la fase d'uso, il calcolo del F.E.P. e dell'energia primaria di ogni caso. L'unità funzionale è rimasta il valore dei m<sup>2</sup> totali di superficie utile  $S_u$  dell'edificio 'Casa famiglia per minori' a Lodi, con fattore di forma  $S/V = 0,584$

#### 5.5.2. Valutazione del valore di minimo impatto per le tipologie di involucro

I diagrammi sono il risultato delle valutazioni condotte e indicano rispettivamente nel primo istogramma l'impatto della chiusura verticale nei quattro casi della tipologia considerata, nel secondo l'impatto energetico per la climatizzazione invernale, richiesto dall'edificio e nel terzo l'impatto complessivo dell'edificio. L'ultimo è la somma dei primi due più gli impatti della copertura e del solaio contro terra, mantenuti fissi. I valori degli impatti di questi ultimi due processi sono comunque indicati in tabella. Per brevità di tale trattazione si riporta solo il caso della valutazione a scala dell'edificio con le chiusure verticali di tipo A con il metodo EcoIndicator99.

Con il valore di  $U = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  si ottiene il minimo valore dell'impatto ambientale complessivo (26,83 kPt).

Metodo Eco-indicator99					
LCA edificio con chiusura verticale di TIPO A	Impatti costanti (kPt)	Impatti delle chiusure verticali esterne modificate (kPt)			
Spessore isolante (cm)		48	25	13	5,2
Trasmittanze (W/mqK)		0,06	0,1	0,2	0,4
Impatto chiusura verticale perimetrale opaca		6,2	4,52	3,65	3,23
Impatto fondazione indiretta e solaio controterra	11,2				
Impatto chiusura superiore opaca	1,98				
Impatto energetico per la climatizzazione invernale		8,39	9,15	10,8	14,4
Impatto complessivo dell'edificio (25 anni)		27,7	26,83	27,6	30,6

Tab. 5-26: Variazione dello spessore dello strato isolante e delle relative trasmittanze termiche per la verifica del minimo impatto ambientale tramite una LCA dei consumi di materia e di energia nella vita utile (service life) di un edificio.

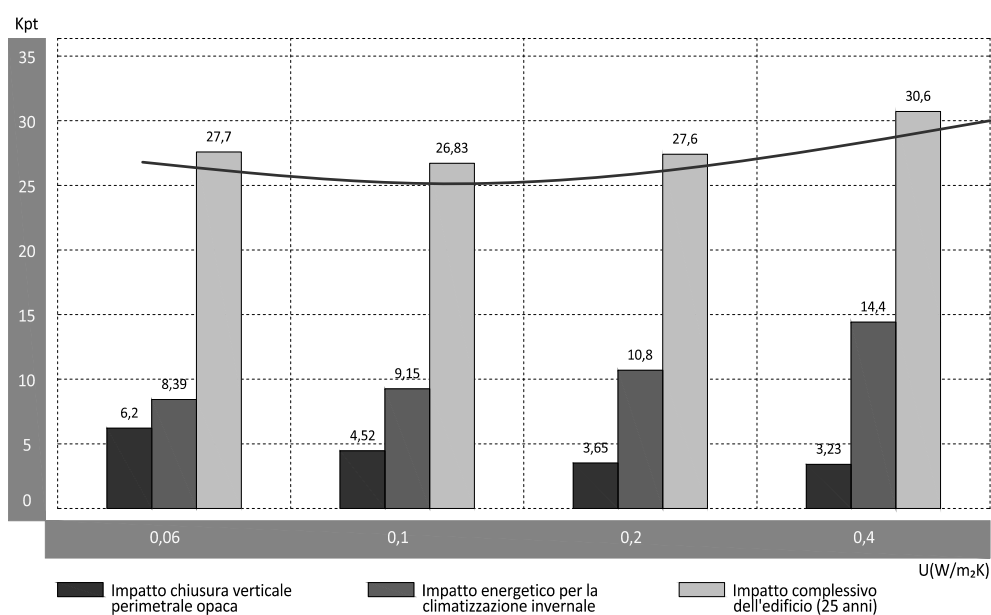


Fig. 5-21: Tabella e diagramma di confronto degli impatti ambientali con il metodo Ecoindicator99 per le soluzioni tipo A con valori di trasmittanza termica  $U$  diversi.

Da 0,1 a 0,06 W/m<sup>2</sup>K devo quasi raddoppiare lo spessore dell'isolante, quindi la quantità di materiale (risorsa) e di consumo energetico in fase di produzione, che rapportati alla Q di calore richiesta per la climatizzazione dell'edificio (ridotta con la diminuzione del valore U) fanno variare il bilancio complessivo, aumentando l'impatto ambientale.

Complessivamente si può affermare che il fattore d'incidenza negli impatti della produzione di maggiori quantità di materiale sia il consumo di risorse e minerali, rispetto al consumo di risorse, che si eviterebbe nella fase d'uso. La curva che unisce i punti degli istogrammi totali è di tipo iperbolico, ma molto bassa, quindi una variazione minima del valore di K può corrispondere a spessori sostanzialmente diversi da 25 cm.

Inoltre, dai risultati degli altri quattro involucri, la differenza degli impatti fra i valori che corrispondono alle trasmittanze 0,1 e 0,2 W/m<sup>2</sup>K è molto basso. Questo significa, per il caso A ad esempio, una diversità di spessore dell'isolante da 25 a 13 cm. A quel punto, è importante ponderare una scelta anche in relazione al consumo di energia nella fase di produzione e alla quantità di energia incorporata nel materiale o nel componente. Ecco come dalla valutazione ambientale, con un processo di feedback, si torna alla valutazione energetica.

## 5.6. Considerazioni conclusive

La residenza sperimentale di Lodi è stata colta come un'occasione sperimentale per identificare in dettaglio, e in pratica, le strategie progettuali maggiormente adeguate ai fini di un bassissimo consumo energetico in climi assimilabili a quello della Pianura Padana. Questa tematica è in totale dibattito attualmente ed è oggetto di diverse ricerche e sperimentazioni. L'iniziale tendenza italiana verso il raggiungimento di bassi consumi energetici degli edifici è stata di trasferimento *tout court* da prassi ormai più consuete d'oltralpe e, se italiane, altoatesine. Tuttavia la problematica in Italia è l'estensione del territorio a più latitudini, per cui questo atteggiamento non può funzionare sul territorio italiano. Alle nostre latitudini è utile aumentare gli spessori degli isolanti e ridurre le dispersioni termiche, ma sono indispensabili anche materiali ad alta inerzia termica e delle superfici di accumulo termico, per assicurare un controllo della radiazione solare anche nel periodo estivo.

Attraverso il contributo di tale studio si è consolidata la convinzione che la metodologia LCA – *Life Cycle Assessment* possa essere un percorso perseguibile. L'impatto ambientale, infatti, non può certamente riferirsi solo alla fase di produzione dei materiali, ma deve essere analizzato in tutto il corso del loro ciclo di vita e di quello dell'edificio in cui sono inseriti, con delle valutazioni complessive. L'LCA è oggi un metodo valido in grado di mettere a sistema, con una logica quantitativa accurata, consumi energetici e impatti ambientali in una visione complessiva. Un iter processuale, come quello descritto, costituisce una strada percorribile e sicuramente preferibile a concezioni più semplicistiche, se gli obiettivi sono finalizzati a valutazioni LCA per una progettazione più attenta al rispetto dell'ambiente.

## 6

### CONCLUSIONI

Il percorso operativo proposto nella parte centrale del saggio, articolato nell'applicazione della metodologia di analisi del ciclo di vita LCA alle diverse scale e per l'ottimizzazione delle fasi del ciclo di vita del sistema – edificio (e ambiente), mette in luce i molteplici spunti per una progettualità orientata verso un ripensamento radicale dell'intervento costruttivo, che antepone la sostenibilità ambientale quale scenario di riferimento. È evidente come l'uso della metodologia LCA possa apparire ancora faticoso, individuata la sua complessità, d'altro canto rappresenta una modalità trasparente e completa di porre a confronto le ricadute ambientali di diverse fasi del ciclo di vita e le scelte materiche, tecnologiche e costruttive. L'applicazione diffusa della metodologia LCA presenta ancora ostacoli da superare, percorsi incerti e, soprattutto, diffidenza dalla maggioranza degli operatori del settore, che piuttosto di approfondire l'approccio, preferiscono optare per metodi semplificatori e approssimativi o affidarsi alle indicazioni filtrate da produttori o associazioni di settore, senza una conoscenza corretta e responsabile.

Si percepisce infatti come rispetto all'opinione diffusa e propensa alla messa in atto di atteggiamenti di salvaguardia dell'ambiente non vi sia una diretta corrispondenza di azioni coerenti, realmente e complessivamente efficaci. La formazione e l'affermazione di una consapevolezza critica da parte di progettisti e costruttori deve rappresentare una volontà forte che contrasti l'informazione pervasiva, allo stesso tempo fuorviante, e una grande opportunità per una inversione di rotta rispetto alle leggi di profitto e mercato che hanno guidato il settore delle costruzioni negli ultimi decenni.

#### **Strategie progettuali oltre l'edificio eco-efficiente**

Contestualità, adattabilità, durata, durabilità, reversibilità, dismissione sono parole-chiave diffuse oramai nelle esplorazioni disciplinari sulla sostenibilità del progetto di architettura; si tratta di un progetto che, in futuro, dovrà essere costruito su un'idea di qualità più complessa, comprensiva di considerazioni, indicatori e parametri per troppo tempo ignorati, come il controllo dell'esaurimento delle risorse, il contenimento energetico, il degrado ambientale, la salubrità ambientale. Indicazioni operative, anche strategiche, metodologie di valutazione degli impatti ambientali, come emerge dalla trattazione di questo testo, esistono e, se pian piano applicate, contribuiranno a un contenimento generale degli impatti e dell'inquinamento. Tuttavia, considerando la complessità del problema, non affrontabile dal singolo progettista, e con l'ambizione di riuscire ad effettuare valutazioni degli impatti nel ciclo di vita degli edifici progettati il più esaustivo possibile o assicurare una ottimizzazione delle fasi

del ciclo di vita edilizio, come si può orientare un progettista nella valutazione degli impatti ambientali e nella previsione di essi? Dove va ad agire? Quali percorsi deve intraprendere? Se emerge il principio di responsabilità di “andare oltre”, il progettista può individuare i nuovi paradigmi, modelli di riferimento o termini di paragone. Secondo un approccio metodologico della valutazione degli impatti ambientali, è fondamentale che egli definisca e delimiti il campo d’azione, il suo oggetto di studio, i problemi contestuali più cogenti e la tecnica migliore per affrontarli.

Prioritario è prendere in considerazione il ciclo di vita dell’edificio stesso come sistema. Con la consapevolezza che l’edificio tipicamente è un bene con una aspettativa di vita lunga rispetto ad altri beni di consumo, non è certo semplice per un progettista poter determinare con esattezza in fase progettuale i flussi in ingresso e in uscita dal manufatto; tuttavia è indispensabile fare delle ipotesi sullo scenario di vita utile, se non addirittura proporre di alternativi, al fine di poter in qualche modo ottimizzare il ciclo anche al variare di alcuni parametri.

Dal punto di vista progettuale non appare prioritario e, allo stesso tempo, risulta anche impossibile ottimizzare tutte le fasi del ciclo di vita: può accadere, come è emerso anche dagli studi presentati nei capitoli precedenti, che, ottimizzando una fase del ciclo di vita, si vadano a pregiudicare altre fasi. La richiesta di soddisfacimento di una determinata prestazione conduce a un esito che può essere diverso se la richiesta fosse stata di soddisfacimento di un’altra prestazione o di due prestazioni messe a sistema: in termini di LCA, definire un’unità funzionale che soddisfi una determinata trasmittanza termica d’involucro può determinare risultati diversi in termini di impatti ambientali di soluzioni comparate, rispetto a definire, oltre a quella prestazione, anche specifici requisiti acustici, piuttosto che di sicurezza al fuoco.

Il progettista dovrebbe, quindi, partire dal contesto di riferimento, compiere scelte di ottimizzazione e di valutazione degli impatti del ciclo di vita in base all’edificio specifico da realizzare, alla sua funzione e alla previsione di vita utile.

Con riferimento ai casi applicativi della metodologia LCA approfonditi nel libro e rispetto alle fasi da ottimizzare emergono di conseguenza alcune strategie di progettazione.

La leggerezza quale strategia di riduzione dei consumi di materiali, risorse e energia è il *leit motiv* che sottende la valutazione LCA del capitolo relativo a *Ciclo di vita del componente e ottimizzazione nell’uso della materia*. È una strategia che ottimizza la fase pre-uso del ciclo di vita di un edificio. Da essa si individuano atteggiamenti progettuali di diverso genere. Da un lato il progetto diventa occasione di ricerca di un’essenzialità naturale, in cui, sull’esempio dei cicli naturali che non sprecano nulla, l’essenza della forma si basa sull’analisi e sull’applicazione di esempi della natura e sulla comprensione delle sue leggi. Si tratta di progetti di architetture leggere quali esito di un corretto equilibrio tra forma e struttura, tra riduzione della materia e degli impatti ambientali ad essa correlati. Rispetto ai principi della sostenibilità ambientale, l’architettura leggera assume la declinazione di leggerezza fisica, come massimizzazione delle prestazioni rispetto alle quantità di materia e energia impiegate, oppure la declinazione di leggerezza “concettuale”, che contempla la costruzione e la decostruzione di una architettura senza influire e condizionare irreversibilmente il contesto ambientale in cui si inserisce.

Costruire leggero implica inoltre disporre di materiali e tecniche costruttive adeguati che lo consentano. Di conseguenza, dall’altro lato, il progetto diventa occasione di ricerca di nuovi materiali, nella contemporaneità quindi di materiali progettati: massima efficienza per la minima materia, grazie all’evoluzione della ricerca di leggerezza e di riduzione del

materia impiegata nelle costruzioni con materiali tradizionali e grazie alle scoperte di nuovi materiali da parte chimica avanzata. Quindi i materiali possono essere progettati ai fini di ottenere una massa ridotta a parità di volume. A tal proposito va sottolineato come la ricerca spinta di ottimizzazione della materia e quindi della fase pre-uso dell'edificio, costruito con tecnologie che prevedano il risparmio materico, riescano comunque a soddisfare, e a non pregiudicare, le altre fasi del ciclo di vita: per esempio materiali avanzati univocamente progettati, spesso rivelano una durabilità limitata e quindi sono difficilmente reimpiegabili o impiegabili in durate di vita estese.

L'efficienza energetica lungo l'intero ciclo di vita quale strategia complessiva di riduzione dei consumi dalla culla alla tomba sottende gli obiettivi della valutazione LCA del capitolo relativo a *Ciclo di vita dell'edificio e contenimento dei consumi energetici*. È una strategia che ottimizza un indicatore ambientale specifico, il consumo di energia, per un intero ciclo di vita. Tipicamente ci si focalizza sull'efficienza energetica della fase d'uso, che, nella maggior parte degli edifici standard e tradizionali del parco edilizio costruito, determina i maggiori consumi di energia e di combustibili non rinnovabili. Dal punto di vista progettuale si sono negli ultimi anni delineati percorsi differenti al fine di diminuire l'uso di risorse in fase d'uso: la bioclimatica, che mira all'ottimizzazione degli scambi tra edificio e ambiente (tramite sistemi attivi e passivi di controllo dell'irraggiamento solare e di ventilazione e considerando le peculiarità del clima, minimizzando gli impianti e progettando oculatamente forma, orientamento e involucro) e l'efficienza energetica, finalizzata a raggiungere massimo confort interno con la minor energia possibile (lavorando sull'efficienza degli impianti e accoppiando impianti a energia rinnovabile). La ricerca di standard sempre più elevati sta orientando le tendenze progettuali all'integrazione dei due percorsi verso la progettazione del sistema "edificio - impianto" (da edifici bioclimatici e edifici passivi verso edifici a zero emissioni, attivi e responsivi).

La valutazione LCA illustrata nel capitolo *Ciclo di vita dell'edificio e contenimento dei consumi energetici* mette a sistema in realtà l'ottimizzazione dei consumi di energia nella fase pre-uso con quella della fase d'uso, che mette a sistema non solo i consumi energetici per la climatizzazione e il funzionamento degli impianti, ma anche quelli relativi alla manutenzione e sostituzione di parti dell'edificio lungo la vita utili. Dallo studio emergono quindi: - la manutenzione e l'adattabilità dell'edificio quale strategia per estendere la vita utile dell'edificio e - la previsione della durabilità di materiali e componenti quale strategia per scegliere tecnologie appropriate alla funzione dell'edificio da progettare e costruire. Estendere la vita utile dell'edificio significa prolungare le sue caratteristiche nel tempo oppure poter modificare lo stesso per poter assicurare l'obsolescenza in un futuro il più remoto possibile. Contemporaneamente ciò significa ammortizzare in un arco di tempo prolungato le risorse materiche e energetiche investite nella costruzione dell'edificio e ridurre i consumi di risorse per costruzione di nuove parti di edificio.

Da ultimo, il capitolo relativo a *Ciclo di vita dell'edificio e riduzione degli impatti ambientali*, considerabile come l'esempio applicativo della metodologia LCA che cerca di contemplare sia l'ottimizzazione delle varie fasi del ciclo di vita che la valutazione secondo tutti gli indicatori di impatto ambientale, riguarda diverse strategie progettuali:

- la prefabbricazione e l'assemblaggio a secco quali strategie per limitare gli impatti e la generazione di rifiuti in fase di costruzione (progettare per componenti);
- l'efficienza energetica in fase d'uso per ridurre il consumo di risorse (come approfondito sopra);
- la reversibilità per estendere la vita utile di materiali e componenti e - lo scenario di fine vita del



riciclo come strategia di riduzione di consumo di risorse e materia. Scegliere componenti prefabbricati e assemblabili a secco, oltre ad offrire grande libertà progettuale, consente di mirare a elevata qualità, riduzione dei tempi di produzione e di messa in opera e soprattutto dal punto di vista dell'eco-efficienza di contenere la produzione di rifiuti di cantiere e i consumi energetici e di materia, che sono necessari in casi di cantiere tradizionale per finalizzare i semilavorati. Di conseguenza tale tecnica di messa in opera, parte del processo decisionale del progetto, si correla direttamente con la fase d'uso e con la possibilità della reversibilità costruttiva durante la vita utile, per poter sostituire alcune parti (sempre senza operazioni di cantiere invasive) o per poter prefigurare una demolizione selettiva a fine della vita utile. La reversibilità costruttiva è una strategia progettuale da prendere in considerazione, soprattutto con la coscienza che attualmente si presentano con maggior frequenza cicli di vita sempre più brevi.

Ad un accorciamento del ciclo di vita dell'edificio corrisponde anche un arco temporale limitato per ammortizzare gli impatti ambientali generati nella fase pre-uso, producendo materiali e componenti, e anche i rifiuti prodotti in caso di demolizione e conferimento in discarica.

Se non è possibile perseguire una durata prolungata delle diverse parti dell'edificio, è auspicabile perseguire il riuso o il riciclo di componenti e materiali. La reversibilità, quindi, consente di "chiudere" il ciclo e, con le operazioni di riuso e di riciclo, consente di avviare una nuova filiera produttiva che offre sul mercato edilizio "nuove materie prime secondarie". Di conseguenza si opera una riduzione dei consumi di materie prime vergini e di energie. La strategia del riciclo a fine vita utile consente inoltre di ottimizzare il ciclo di vita di edifici futuri (tramite l'uso di prodotti "verdi"), dopo aver ottimizzato quello dell'edificio da cui provengono gli scarti. Questa stessa strategia mette in evidenza un'altra volta l'importanza del *life cycle design* per rendere efficace l'ottimizzazione delle diverse fasi del ciclo edilizio, poiché proprio durante il progetto è importante stabilire al tecnico costruttiva, che destina il livello di reversibilità e decostruzione dell'edificio dopo al sua vita utile.

### **Recepimento dei requisiti ambientali e traiettorie di eco-efficienza tra ricerca scientifica e strategie operative**

Nel contesto operativo, fortemente sottomesso dalle speculazioni economiche, appare quanto mai attuale il ruolo della ricerca scientifica nel proseguire verso l'individuazione di questioni interferenti con il processo edilizio, ancora oscure poiché non approfondite con adeguatezza. È necessario un confronto con i problemi concreti derivanti dalla attenzione alla sostenibilità ambientale nei processi di sviluppo e occorre traguardare azioni coerenti nell'ambito della ricerca scientifica e oneste dal punto di vista sociale, economico e politico.

Una delle possibili strade da perseguire è la democratizzazione dei temi della sostenibilità, che va di pari passo con la democratizzazione delle conoscenze, cioè con la messa a disposizione dei cittadini delle conoscenze scientifiche e delle competenze tecniche. Va superato il pensiero vetusto che il mondo sia diviso tra una ricerca di base, fatta nelle università o nei centri di ricerca nazionali, e una ricerca funzionalizzata, autofinanziata dall'industria. Per far questo, a parere mio, occorre un modo diverso di concepire i rapporti tra le diverse forme sociali, i centri di ricerca, l'università, le fondazioni, la ricerca applicata dentro l'industria, l'aspetto tecnologico di base etc., considerando che l'innovazione non attinge sempre dall'alta ricerca e poi scende in basso, ma talvolta può fare un circolo completamente diver-

so, secondo un sistema non lineare. Nel campo dell'innovazione, sia nella ricerca di base, sia della scienza applicata, ritengo che la proliferazione di nuove idee e l'anticonformismo siano cose utili e importanti. Quindi ambire alla democratizzazione della conoscenza scientifica implica investire nella ricerca e nella possibilità di una disseminazione, nella convinzione che l'investimento iniziale ci permetterà di avere enormi vantaggi e risparmi sul terreno della sostenibilità e dello sviluppo.

Con uno sguardo sul mondo professionale della progettazione e delle costruzioni si percepisce una grande difficoltà a districarsi in un contesto articolato, spesso divergente di requisiti da soddisfare. Bisogna ammettere come si disponga di strumenti validi a supporto della progettazione per l'eco-efficienza degli edifici, ma allo stesso tempo non si intraveda ancora una prospettiva in cui si possa pensare di avere sotto controllo tutta l'informazione necessaria per compiere scelte efficaci e efficienti per un ciclo di tempo e di vita prolungati.

Da un lato, la ricerca si assume comunque il compito di contemplare in modo esaustivo a trecentosessanta gradi i temi della eco-efficienza ambientale, pur nella loro estrema complessità e ricchezza di aspetti diversificati e specifici, contrastando gli approcci di parte semplicistici e semplificatori.

Dall'altro l'architetto, che si assume per sua formazione e cultura capacità di interdisciplinarietà, deve comprendere come sia necessario passare dalla linearità alla complessità; ciò implica abbandonare la disciplinarietà per entrare nella interdisciplinarietà e transdisciplinarietà, allargata alla capacità di trovare lui stesso nuove tecnologie, essere competitivo (per risolvere i problemi relativi ai costi) e soprattutto essere capace di fare un qualcosa esteticamente apprezzato e condiviso.

Concludendo è possibile tratteggiare il percorso in cui si sta direzionando il mondo della scienza, con l'intento di delineare un quadro estremamente chiaro e oggettivamente significativo per inquadrare la valutazione dell'eco-efficienza di un manufatto architettonico dentro i diversi *step* del processo progettuale e costruttivo. Come rilevato nel presente saggio, il percorso è tracciato. D'altro canto rimane ancora molta strada da fare nel mondo del progetto di architettura che deve riuscire a convergere nella direzione auspicata dalla scienza e oltrepassare il livello di superficialità nella considerazione dell'approccio sostenibile e al ciclo di vita dell'edificio. Gli atteggiamenti del mondo del progetto sono di vario genere: presumibilmente, in un'ottica di *Life Cycle Thinking*, non abbracciano la completezza sistemica del problema, tuttavia rivelano un approccio di estremizzazione progettuale, focalizzandosi solo sull'ottimizzazione di singole fasi del ciclo di vita, offrendo tuttavia risultati interessanti.

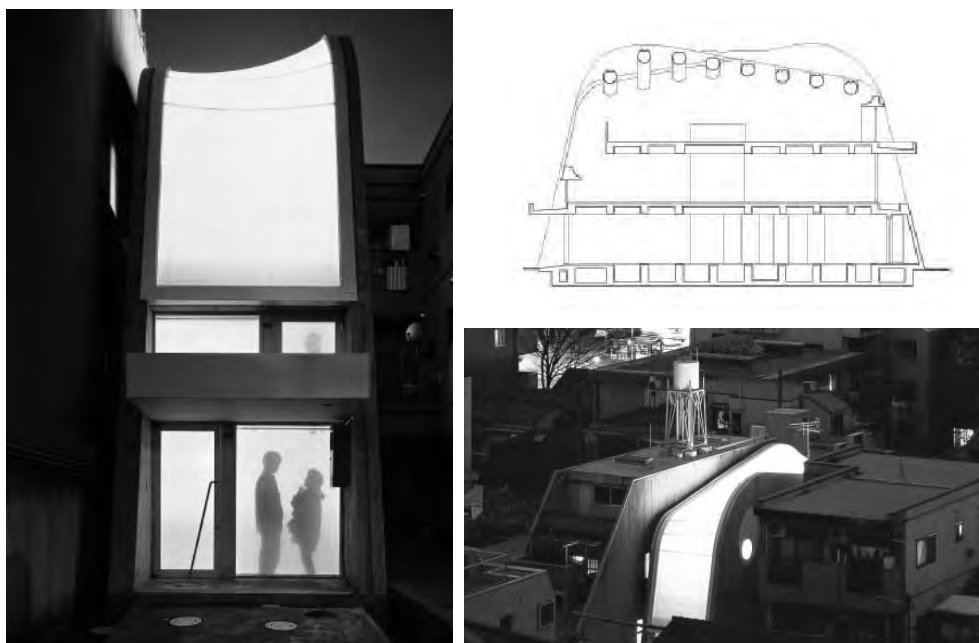
Limitandosi al riferimento delle strategie emerse tramite la trattazione dei casi di applicazione della LCA nei capitoli precedenti, si riscontrano nel mondo della progettazione atteggiamenti diversi che ad ogni modo cominciano a sensibilizzare il progetto alla riduzione degli impatti ambientali.

Focalizzando l'attenzione sull'ottimizzazione della fase pre-uso con il contenimento di materia e risorse, vi sono esiti progettuali di manufatti architettonici che esaltano il tema della leggerezza (es. § caso comparativo tra etfe, pvc crystal, pc e vetro del cap. 3; Aura House di F.O.B.A, Tokyo, Giappone (1998); Modern Tea House di Kengo Kuma, Francoforte, Germania (2007); Wall House di FAR Frohn & Rojas, Santiago del Cile, Cile (2007)).

---

**La leggerezza quale strategia di riduzione dei consumi di materiali, risorse e energia**

---



*Fig. 6-1: Costituita da due pareti di cemento armato dal profilo arrotondato che costeggiano il vicolo, Aura House è sostenuta da un sistema di pilastri orizzontali cilindrici che vanno da una parete all'altra all'altezza del soffitto, con effetto decorativo; per risolvere il problema della luce in una casa larga meno di tre metri e illuminata da una sola, piccola finestra a oblò al terzo piano la scelta è stata di collegare le due pareti di cemento con una membrana di materiale tessile traslucido, che lascia penetrare la luce.*

*Tale scelta materica per l'involucro monostrato ottimizza la fase di produzione dei componenti d'involucro grazie alla sezione sottile, con un risparmio di materia legato alla leggerezza della membrana (rispetto a un involucro rigido, opaco con inseriti dei serramenti tradizionali per l'illuminazione naturale); sicuramente è efficace in fase di cantiere poiché riduce i tempi e le operazioni per l'installazione, tuttavia tale ottimizzazione va presumibilmente a discapito della fase di gestione, in cui andrebbero verificate le condizioni di confort interno, e di manutenzione, pensando ai cicli di pulizia della membrana e non essendo a conoscenza della durata prevista dell'edificio residenziale e della durabilità dell'involucro (Fonte: Aa.Vv., Minihäuser Japan, Verlag Anton Puster Salzburg, Salisburgo, 2000).*



*Fig. 6-2: Questo padiglione tessile pneumatico, realizzato per il Museo delle Arti Applicate a Francoforte, è esempio di progettazione integrata tra progettista, azienda di confezionamento dell'involucro e studio di ingegneria e allo stesso tempo esempio di ottimizzazione formale (e strutturale), carattere architettonico e ottimizzazione del materiale, con lo sfruttamento totale delle peculiarità proprie del materiale PTFE espanso; i componenti di questa architettura sono pochi, dal momento che struttura e involucro si esauriscono in aria e membrana a doppio strato; di conseguenza la fase costruttiva prevede la realizzazione del basamento, il posizionamento e il gonfiaggio ad aria delle membrane, con tempi di costruzione estremamente ridotti. Il materiale per l'involucro è di natura sintetica e, supponendo che il profilo ambientale possa coinvolgere processi ad alto impatto ambientale, il bilancio si compensa visto il peso limitato dell'intero involucro rispetto a una realizzazione simile, ma con materiali rigidi e più pesanti, che avrebbero richiesto una struttura aggiuntiva (Fonte: documentazione fornita da Canobbio S.p.a., Castelnuovo Scrivia, AL)*



*Fig. 6-3: La Wall House è un esempio di integrazione tra leggerezza ed efficienza energetica in relazione con il contesto climatico; la scelta di un sistema di involucro estremamente leggero, quale smaterializzazione del concetto di muro, è stata perseguibile grazie alle condizioni climatiche esterne e alle funzioni, in alternativa a pareti massive. Dal nucleo interno verso l'esterno i muri si "alleggeriscono" al diminuire della necessità di privacy da parte degli utenti e i materiali si diversificano per densità, peso e trasmissione della luce: da cemento armato a scocche in legno al polycarbonato alveolare che delimita gli spazi aggregativi e una membrana tessile, di diversa tessitura a seconda dell'orientamento, quale schermo solare e protezione dagli insetti. Il progetto presenta l'applicazione di materiali trasferiti da altri settori industriali e quindi applicati sperimentalmente con l'obiettivo di testarne le potenzialità. Oltre al perseguimento della leggerezza dei componenti e della semplice tecnica di assemblaggio, è interessante sottolineare come la totale reversibilità e il non accoppiamento dei materiali di origine sintetica consenta in una fase futura di sostituzione o smontaggio delle parti dell'edificio di separare selettivamente con facilità i materiali e poterli riusare o avviare alla filiera del riciclo (Fonte: Pagliari F. (2009), "Wall House", in *The Plan*, n.36, pp. 86-94, Zanelli A. (2008), "Membrane e Scocche", in *Arketipo*, n.27, pp.58-69, [www.f-a-r.net](http://www.f-a-r.net)).*

Altri atteggiamenti si focalizzano sulle tecniche costruttive della prefabbricazione, sposando l'ottimizzazione della fase di costruzione e, conseguentemente, agevolando in un secondo momento, attraverso al reversibilità, lo smontaggio e il riutilizzo del manufatto o delle sue parti (es. § caso dell'edificio di Lodi nel cap. 5, costruito con componenti prefabbricati e solo assemblati in opera con operazioni meccaniche; Container City di Nicholas Lacey & Partner, Inghilterra (2001-2002); Space Box di Mart de Jong e De Vijf, Olanda (2003); M-CH Home di Richard Horden, Cherry Lee, Haack + Kopfner, (2005)).

---

**La prefabbricazione e l'assemblaggio a secco quali strategie per limitare gli impatti e la generazione di rifiuti in fase di costruzione (progettare per componenti)**

---



*Fig. 6-4: Container City è una realizzazione containerizzata sperimentale realizzata in un'area piuttosto degradata nell'East Indian Dock di Londra, con numerosi porti industriali, quindi grandi quantità di container. Gli alloggi realizzati recuperano i container dismessi, che altrimenti sarebbero smaltiti con costi piuttosto elevati. Quindi tale esempio testimonia una ottimizzazione della fase di fine vita di prodotti estranei al settore delle costruzioni; ciò consente di disporre di elementi prefabbricati, che fungono da struttura per nuovi edifici, quindi ridurre la produzione di materiali e il correlato consumo di energie per fare nuovi elementi strutturali. I container utilizzati sono stati migliorati, con aggiunta sotto l'aspetto della resistenza meccanica e delle prestazioni termiche, attraverso alcuni interventi di irrigidimento e di isolamento, quindi con l'aggiunta di nuovi materiali, che comunque collaborano ad ottimizzare la fase d'uso, cercando di implementare l'involucro per un miglior comfort interno. Per consentire l'uso abitativo, sono aggiunti impianti, balconi, porte e finestre, che, insieme alle possibili finiture interne e ai diversi colori per l'esterno, migliorano l'aspetto estetico e la durabilità degli elementi costruttivi consentendo anche di personalizzare gli spazi abitativi. L'assemblaggio in cantiere richiede solo una gru per sovrapporre i moduli abitativi e le connessioni fra questi sono realizzate con sistemi veloci e reversibili (Fonte: Masotti C. (2010), Manuale di architettura di emergenza e temporanea, Sistemi Editoriali, [www.containercity.com](http://www.containercity.com)).*



*Fig. 6-5: La soluzione temporanea di SpaceBox è realizzata con un sistema costruttivo innovativo; racchiude un sistema costruttivo leggero e prefabbricato che ne consente il facile assemblaggio in cantiere: è possibile consegnare e montare in un solo giorno oltre 10 unità utilizzabili per oltre 30 anni o trasferibili altrove secondo le necessità. La struttura in acciaio consente la sovrapposizione oltre 3 livelli e l'accostamento dei moduli abitativi con una sola gru senza richiedere l'innalzamento di un'extra-struttura. La forma della struttura di Space Box consente di realizzare una grande superficie vetrata e le elevate prestazioni termiche consentono di abbattere i costi di gestione: 1,8 kW per unità al giorno nei mesi più freddi. I pannelli verticali e orizzontali rispondono ai requisiti richiesti dalla normativa olandese in termini di risparmio energetico. L'esempio costruito è manifesto dell'ottimizzazione della fase pre-uso, della fase di cantiere e della fase di gestione che, con la nota durata di vita di 30 anni, consente di fare previsioni sulla manutenzione e sui possibili scenari di fine vita. La prefabbricazione e l'assemblaggio a secco dei componenti di ogni modulo e del modulo stesso chiaramente consentono la totale reversibilità del sistema (Fonte: Masotti C. (2010), Manuale di architettura di emergenza e temporanea, Sistemi Editoriali, [www.spacebox.nl](http://www.spacebox.nl)).*



*Fig. 6-6: Micro-Compact Home è un piccolo modulo abitativo (266 x 266 x 266cm per 2,2tonn.), progettato come un oggetto di design che utilizza sperimentalmente materiali e sistemi costruttivi leggeri e altamente performanti derivati dall'industria aerospaziale, navale e automobilistica al fine di ottenere un alloggio di dimensioni minime, aggregabile, confortevole (dotata di impianto di riscaldamento, di condizionamento, sistema anti-incendio e, come optional, di pannelli fotovoltaici) e adattabile a diversi contesti. I cubi di M-CH possono essere aggregati anche verticalmente con una struttura di tubolari metallici (diametro 150 mm), anch'essa totalmente smontabile e riutilizzabile per adattarsi ad altri luoghi. Sono totalmente costruiti in fabbrica, e il loro ciclo di vita elimina completamente la fase di costruzione, limitandosi al posizionamento in loco tramite gru: la fase di cantiere si esaurisce nell'allacciamento alla rete elettrica e idrica. A fine della vita utile, contenuta rispetto a normali residenze, può essere riportata in azienda per essere mantenuta: una concezione estrema al punto di assomigliare a un bene di consumo come l'automobile.*

*L'ottimizzazione, tramite la leggerezza, della fase pre-uso, in un caso come questo, non assicura un'altrettanta efficacia della fase d'uso: a spazi limitati corrispondono senz'altro consumi limitati, tuttavia non è prevista alcuna strategia di efficienza energetica, partendo dall'inserimento nel contesto. È prevista realizzata con gli stessi materiali e le stesse prestazioni d'involucro, per essere inserita in qualsiasi contesto climatico. Il suo breve ciclo di vita, avvantaggiato da cicli di manutenzione/revisione in azienda, che si accolla anche gli scarti a fine vita, implica creazione di rifiuti non ammortizzabile in tempi sufficientemente lunghi oltre alla richiesta di nuove materie prime per fare nuove case (Fonte: Masotti C. (2010), Manuale di architettura di emergenza e temporanea, Sistemi Editoriali, [www.microcompacthome.com](http://www.microcompacthome.com)).*

Le estremizzazioni, in particolar modo frequenti in questi anni, di edifici a basso consumo energetico, di case passive o *Zero emission buildings* intendono efficacemente ottimizzare la fase di vita utile con ingenti riduzioni dei consumi di energia primaria per la climatizzazione nella vita utile (Soltag energy Housing di Nielsen & Rubow, Horsholm, Danimarca (2005); More with less di Cibic&Partenrs e Dogtrot, Italia (2009); Prototipo residenziale Casa Zero Energy di P.P. Stelo e A. Savorelli Studio Solarch, Tricesimo, Udine, Italia (2008-2010)).

---

**L'efficienza energetica nella fase d'uso quale strategia di riduzione dei consumi di risorse non rinnovabili**

---



*Fig. 6-7: Soltag energy Housing rappresenta un caso eccellente di ottimizzazione energetica della fase d'uso, con generazione in attivo di energia pulita che viene immessa in rete. È stato previsto come sistema prefabbricato integrabile anche a edifici esistenti degli anni Settanta e Ottanta, offrendo una riqualificazione energetica anche di quelli. Il sistema abitativo Soltag è un progetto dimostrativo esito di un progetto Europeo del Sesto Programma Quadro e consiste in due moduli aggregabili prefabbricati adattabile a climi nordici (l'involucro è a elevati spessori di materiale isolante), dove non è necessaria la climatizzazione estiva artificiale. Il sistema contempla la captazione di luce e aria dalle falde inclinate del tetto, ottimizzate per ridurre il fabbisogno di energia per l'illuminazione degli spazi interni, e un impianto domotico per regolare l'ombreggiamento, con il massimo apporto di calore in inverno e viceversa d'estate. Con tutta la dotazione impiantistica, focalizzandosi alla sola fase d'uso, è un edificio a emissioni zero. Tuttavia, considerando gli spessori di materiale isolante e i componenti (edilizi e impiantistici) dell'involucro, la fase pre-uso non è stata obiettivo dell'ottimizzazione energetica e anche l'ottimizzazione della fase d'uso si limita ai consumi energetici per gli impianti e la climatizzazione, senza considerare la gestione della manutenzione e della ristrutturazione. Essendo moduli prefabbricati si riducono le operazioni di costruzione e successivamente la reversibilità, non sottovalutando i numerosi componenti dell'edificio. (Fonte: DTI (Danish Technological Institute), "Results of the EU Demohouse research project" in paper pubblicato 05/2008, [www.ecobuilding-club.net](http://www.ecobuilding-club.net))*



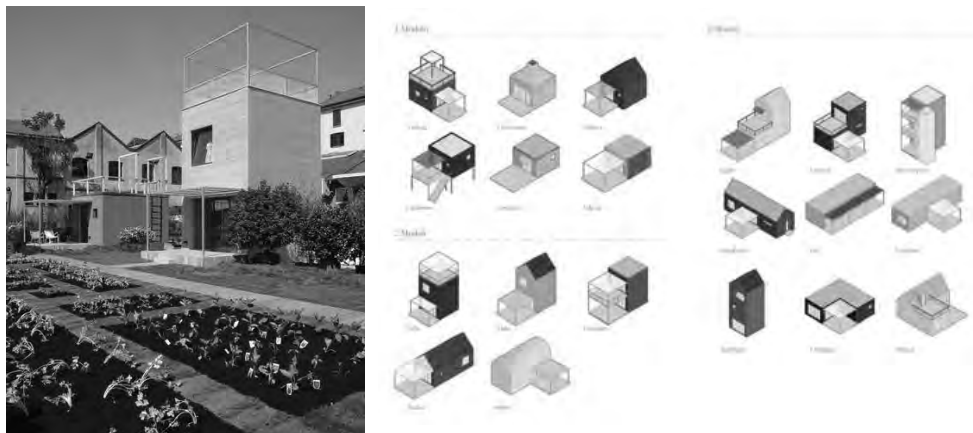


Fig. 6-8: Come il caso precedente *More with less* è un esempio di grande integrazione impiantistica e di ottimizzazione della fase d'uso e, in particolare, dei consumi energetici e di risorse: - il sistema di riscaldamento radiante a pavimento e l'impianto dell'acqua calda possono essere collegati a pannelli solari termici, a impianti a biomassa e geotermici; - i moduli abitativi (singoli, doppi o tripli) prevedono il recupero delle acque piovane in apposite cisterne, sistemi per il risparmio e la depurazione dell'acqua e la raccolta differenziata dei rifiuti. L'elettricità può essere parzialmente fornita da pannelli fotovoltaici e generatori eolici e l'illuminazione a LED permette di ridurre i consumi energetici. Risulta essere un sistema flessibile e adattabile (Fonte: Masotti C. (2010), *Manuale di architettura di emergenza e temporanea*, Sistemi Editoriali, [www.cibicpartners.com](http://www.cibicpartners.com)).

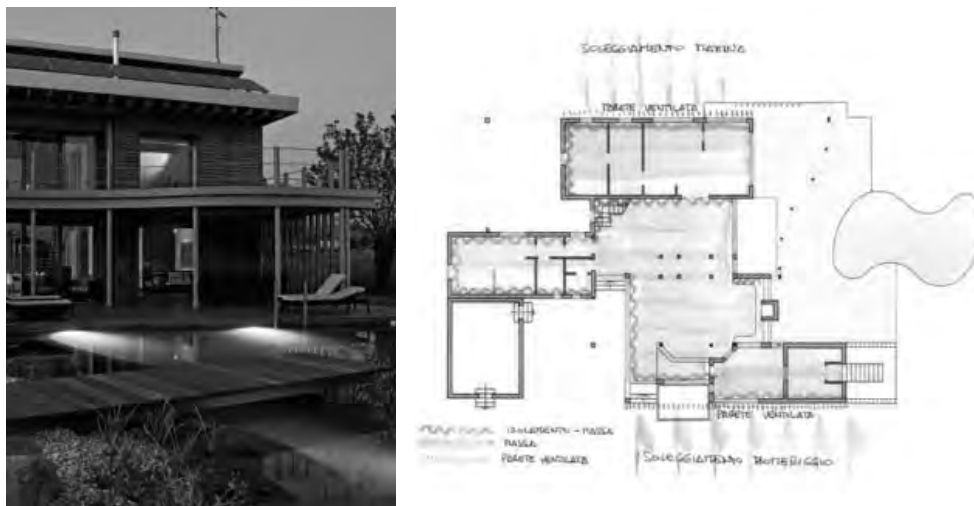


Fig. 6-9: Il prototipo residenziale *Casa Zero Energy* è esempio di integrazione fra attenzioni progettuali bioclimatiche e sistemi passivi senza il bisogno di impianti di climatizzazione e senza attingere a fonti non rinnovabili (non è allacciata alla rete del gas metano e ha ventilazione naturale), funziona con pannelli solari, fotovoltaico e pompa di calore con sonde geotermiche orizzontali, ha impianto di filtraggio e riutilizzo delle acque nere. (Fonte: materiale fornito da Casa Zero Energy, [www.casazero-energy.net](http://www.casazero-energy.net)).

Per ottimizzare la fase di produzione e la fase di fine vita di componenti edilizi e prodotti, contribuendo alla riduzione di consumo di risorse primarie e di produzione di scarti e rifiuti edilizi, nel mondo progettuale vi sono esempi di architetture in cui il riuso e riciclo di materiali e componenti viene enfatizzato (Villa Welpeloo di 2012Architecten, Poombeek, Olanda (2009)).

---

**Lo scenario di fine vita del riciclo come strategia di riduzione di consumo di risorse e materia per ottimizzare la fase di fine vita e chiudere i cicli**

---



*Fig. 6-10: Villa Welpeloo, edificio residenziale, rappresenta uno dei casi più emblematici di architetture costruite quasi completamente con componenti e materiali di riuso (circa il 70%) e reperiti da industrie entro un raggio d'azione di 15 Km dal cantiere (assi di legno per il rivestimento esterno provenienti da bobine per l'avvolgimento di cavi trattati per esser più durevoli, travi d'acciaio per la struttura provenienti dai resti di una macchina tessile in disuso, sabbiate, ridipinte e tagliate della dimensione richiesta, pannelli di polistirene per l'isolamento termico dell'involucro reperiti da un vecchio edificio in disuso, finestre riutilizzate da una ditta locale, legno per solai, partizioni e copertura acquistati come scarti da una azienda locale). Il riuso è lo scenario di fine vita meno impattante, rispetto al riciclo, poiché limita ulteriormente la fase di produzione di nuovo materiale da e non comporta ulteriori lavorazioni energivore, il solo riadattamento di materiali e componenti che diventerebbero scarti da conferire in discarica. Considerando che lo studio di progettazione ha stimato che per la produzione della facciata sono state emesse solo il 5% delle emissioni di CO<sub>2</sub> che sarebbero state emesse con rivestimento simile, ma vergine e di prima mano, e per la struttura il 12% di emissioni, l'obiettivo di tale realizzazione è corrisposto all'ottimizzazione della fase di produzione di materiali e componenti e, chiaramente, della fase di fine vita dei componenti di altri edifici da cui provengono gli scarti. Va considerato che a tali vantaggi, corrisponde una produzione di scarti durante le fase di cantiere per l'adattamento alla nuova funzione dei componenti reperiti (Fonte: Giurdanella V, Superbi G., Viscuso S., Zanelli A., Assemblage, la libertà costruttiva, Gruppo Sole 24 Ore, Milano, [www.2012architecten.nl](http://www.2012architecten.nl))*

Sempre nel mondo della progettazione cominciano a configurarsi strutture di studi di progettazione che adottano filosofie progettuali apparentemente avanguardiste o estremiste nel considerare il tema della sostenibilità e della riduzione degli impatti ambientali: è il caso di alcuni studi di progettazione, per esempio quello di William McDonough negli USA, in cui i progetti architettonici si basano sul concetto di chiusura del ciclo di vita *“Cradle to Cradle”* (dalla culla alla culla), ispirato dai sistemi naturali e cercano di incarnare tre principi derivati dalla natura: 1. Ogni cosa è una risorsa per qualcos'altro. In natura lo scarto di un sistema diventa cibo per un'altra. Gli edifici possono essere progettati per essere smontati e restituire le parti in sicurezza alla terra tramite sistemi di degenerazione controllata (nutrienti biologici), o reimpiegati come materiali di alta qualità per i nuovi prodotti e gli edifici (nutrienti tecnici). 2. Utilizzare l'energia rinnovabile. Gli esseri viventi crescono e vivono grazie all'energia guadagnata dal sole. Allo stesso modo, le costruzioni possono utilizzare l'energia rinnovabile in molte forme, come ad esempio energia eolica, geotermica e gravitazionale capitalizzando in tal modo su queste risorse abbondanti e allo stesso tempo rispettando la salute umana e ambientale. 3. Celebrare la diversità. In tutto il mondo, la geologia, l'idrologia, la fotosintesi e il ciclo dei nutrienti, adattato al locale, produrre una sorprendente varietà di vita naturale e culturale. Progetti che rispondono alle sfide e alle opportunità offerte da ogni contesto si adattano efficacemente nelle proprie localizzazioni cercando di ottimizzare l'equilibrio tra naturale e artificiale.

Il processo progettuale è, in ogni modo, sempre più una fatica soprattutto culturale oltre che operativa, in modo particolare nel momento critico attuale, ed è necessario farlo riemergere e riaffermare sopra ogni logica di mercato, sopra ogni ostacolo repressivo e sopra ogni eccessivo specialismo, lavorando, da un lato, sul fronte della cultura e della tecnica e, dall'altro, sulla consapevolezza critica verso le problematiche ambientali.

Il futuro può essere costruito e noi dobbiamo progettarlo.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

## Introduzione

- Aa.Vv. (2004), *Life Cycle Approaches, The road from analysis to practice*, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative
- FRIEDMAN Y. (2011), *L'ordine complicato. Come costruire un'immagine*, Quodlibet Abitare, Macerata.
- BALDO G. L. (2005), *Analisi del ciclo di vita LCA: materiali, prodotti, processi*, Edizioni Ambiente, Milano.
- BERTOLDINI M., CAMPIOLI A. (2009), *Cultura Tecnologica e ambiente*, Città studi, Milano, pag.77.
- BISTAGNINO L. (2003), *Design con un futuro*, Time & mind, Torino.

## Capitolo 1

## Nuovi approcci per il progetto di architettura ambientalmente responsabile

- Aa.Vv. (2004), *Libro bianco "Energia Ambiente Edificio"*, Il Sole 24 Ore, Milano
- Aa.Vv. (2008), *La durabilità dei componenti edilizi - The durability of building components*, ediTecnica, Palermo.
- ADALBERTH K. (1997), "Energy use during the life Cycle of Building: a Method", in *Building and Environment*, n. 4, vol. 32, pp. 317-320.
- ADALBERTH K. (1997), "Energy use during the life Cycle of Single-Unit Dwellings: Examples", in *Building and Environment*, n. 4, vol. 32, pp. 321-329.
- ANDRETA E. (2011), "Le tre rivoluzioni (macro - micro - nano) che stanno cambiando il mondo", in *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, n.1, pp. 18-25.
- ANTONINI E., GIURDANELLA V., ZANELLI A. (2010), *Reversible Design Strategies to Allow Building Deconstruction and a Second Life for Salvaged Materials*, in Zachar J. et alii, Main proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 28-30 Giugno 2010, Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- ASSOCIAZIONE SVIZZERA INQUILINI (MV) E DALL'ASSOCIAZIONE DEI PROPRIETARI IMMOBILIARI (HEV Schweiz) (2005), *Tabella della durata di vita*, SMV, Massagno, Svizzera.
- BCIS (2006). *Life expectancy of building components, Surveyors' experience of buildings in use, a practical guide*, UK
- BERTOLDINI M., CAMPIOLI A. (2009), *Cultura Tecnologica e ambiente*, Città studi, Milano, pag.69.
- BISTAGNINO L., CASATI B., JACHIA E. (1995), *Definizione di progettazione ambientale ecosostenibile*, in Gamba G., Martinetti G., a cura di, *Dizionario dell'ambiente*, UTET, Torino.
- BRITISH RESEARCH ESTABLISHMENT (2009), *Green Guide BRE*, London
- CANGELLI E., PAOLELLA A. (2001), *Il progetto ambientale degli edifici*, Alinea, Firenze.
- COLLINGE W. O. et al. (2011), "Enabling Dynamic Life Cycle Assessment of Buildings with

Wireless Sensor Networks”, in *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 16-18 Maggio, Chicago, IL, USA.

DEBACKER, W. et al., 2007, “4 Dimensional design: From strategies to cases – Generation of fractal grammar for reusing building elements”, in *International Journal of Ecodynamics* 2007, pp. 258 – 277.

DIERNA S. (2001), *Introduzione* in Piercarlo Crachi (a cura di), Enzo Frateili. *Architettura Design Tecnologia*, Skira, Milano.

C. DI GIORGIO, “Così la Terra consuma se stessa”, da *La Repubblica* del 25 Giugno 2002

FACONDI D., PIARDI S. (a cura di) (1998), *La qualità ambientale degli edifici*, Maggioli, Rimini.

FLAGGER F. (2003), *The Design of Building Structures for Improved Life-Cycle Performance*, MIT Press, Boston.

GANGEMI V. (a cura di) (2004), *Riciclare in architettura. Scenari evolutivi della cultura del progetto*, Clean, Napoli.

GUAZZO, G., COCCHIONI, C. (1984), *Progetto e qualità ambientale. Abitare e costruire in un campo di variabilità*, Veutro, Roma.

HAPM (Housing Association Property Mutual), *Component Life Manual* (4° edizione), E & F.N. Spon, London, 1996

HEIDEGGER M. (1954), *Bauen, Wohnen, Denken*, in *Vorträge und Aufsätze*, Günther Neske, Pfullinger (tr. it. *Costruire, Abitare, Pensare*, in *Saggi e discorsi*, a cura di G. Vattimo, Mursia, Milano, 2007 )

HILL R.C., BOWEN P.A. (1997), “Sustainable construction: principles and framework for attainment”, in *Construction Management and Economics*, n.15, pp 223-239.

JOHN S., BUCHANAN A., PEREZ N. (2009), *The Carbon Footprint of Multi-storey Buildings Using Different Construction Materials*, A report written under contract to the New Zealand Ministry of Agriculture and Forestry, Christchurch, New Zealand.

KORNMANN M. (2008), *Rapport de recherche - Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie – Étude bibliographique des avis d’expert*, CTMNC, Parigi.

LAURIA M. (2008), *La permanenza in architettura. Progetto, Costruzione Gestione*, Gangemi, Roma.

LE CORBUSIER P. J. (1933), *Carta di Atene*, congresso CIAM.

LEVASSEUR A. et alii (2010), “Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessment”, *Environmental Science & Technology*, vol. 44, pp. 3169-3174.

LUCUIK M. (2007), *Durability and Life Cycle Analysis*, Morrison Hershfield Limited, Canada.

MALDONADO T. (1970), *La speranza progettuale*, Einaudi, Torino.

MANFRON V. et alii (a cura di) (2006), *Costruire il progetto sostenibile*, Saggio bibliografico, in Archivio delle tecniche e dei materiali per l’architettura e il disegno industriale ARTEC, luav, in <http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Archivio-d/approfondi/sostenibil/Saggio-bibliografico.pdf> visto il 23 agosto 2012.

MCDONOUGH W. (2002), “Buildings like trees, cities like forests” in *The Catalogue of the Future*, Pearson Press, Upper Saddle River, USA.

MCDONOUGH W., Braungart M. (2002), *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York.

MERCALLI L. (2011), *Prepariamoci a vivere in un mondo con meno risorse, meno energia, meno abbondanza...e forse più felicità*, Chiarelettere, Milano.

MOLINARI C. (2002), *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia - Vol. I La manuten-*

- zione come requisito di progetto, Simone Sistemi Editoriali, Napoli.
- MOLINARI C. (2011), "Prefazione", in Talamo C., *Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia - Vol II Il piano di manutenzione - Ambiti di applicazione, strategie e procedure*, Simone Sistemi Editoriali, Napoli.
- NARDI G., (1991), "Il progetto euristico in architettura", in Marisa Bertoldini, a cura di, *L'atto progettuale. Struttura e percorsi*, CittàStudi, Milano.
- NERVI P. L. (1963), *È già iniziato l'immutabile stile del futuro?*, Roma, Tip. della Pace.
- NORBERG-SCHULZ C. (1979), *Genius Loci*, Electa, Milano.
- PADUART A. et al. (2006), *Transforming Cities: Introducing Adaptability in Existing Residential Buildings through Reuse and Disassembly Strategies for Retrofitting* in <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB14274.pdf> visto il 28.06.2011, CMS2009 Conference on Construction Material Stewardship – Lifecycle design of buildings, systems and materials. CONFERENCE PROCEEDINGS, Rotterdam, 12 - 15 Jun 2009.
- PAGANIN G. (edizione italiana a cura di) (2007), *Guida alla manutenzione e al recupero degli edifici: tecniche, patologie*, Sistemi editoriali, Napoli.
- PAPANEK V. (2005), *Design for the Real World - Human Ecology and Social Change*, II ed., Academy Chicago Publishers.
- PERRET J. (2001) *Guida alla manutenzione degli edifici: 308 schede tecniche su frequenze e modalità di intervento*, edizione italiana a cura di C. Talamo, Maggioli, Rimini.
- PERRET J. (1995), *Guide de la maintenance des batiments*, Le Moniteur, Paris, traduzione italiana a cura di Talamo C., *Guida alla manutenzione degli edifici*, Maggioli, Rimini, 2001
- PERRICCIOLI M. (2004) (a cura di), *Abitare Costruire Tempo*, CLUP, Milano.
- PERRICCIOLI M. (2008) (a cura di), *Incontri dell'annunziata. Giornate di studio sull'innovazione tecnologica*, Atti della V e VI edizione del convegno, 4-5 dicembre 2003, 15-16 dicembre 2004, Simple, Macerata.
- Pedersen Zari M., Jenkin S. (2012), *Redefining cutting edge sustainable design: from eco-efficiency to Regenerative development*, Ministry for the Environment, New Zealand Government Wellington.
- PRESTINENZA PUGLISI L. (2002), *Tre parole per il prossimo futuro*, Meltemi, Roma.
- Reap J. et alii (2008), "A survey of unresolved problems in life cycle assessment - Part 2: Impact assessment and interpretation," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 13, pp. 374-388.
- RIZZI F. (2002), "The lifespan of Buildings in the United Kingdom", in *Architectural Institute of Japan*, n. 1494, vol. 117, pp. 10-11.
- RUGGIERO R. (2009), 01\_ "Architettura/Tecnica/Costruzione", dispensa del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura, Progettazione dei Sistemi Costruttivi, Scuola di Architettura e Design "Eduardo Vittoria", Corso di Laurea in Scienze dell'Architettura, AA 2009/2010.
- SINOPOLI N. (2010), "Lo stato della tecnologia", in *Costruire*, giu., n. 325.
- SOCOTEC (2006), *Guide Socotec de la maintenance et de la réhabilitation*, Groupe Moniteur, Paris
- TAGLIAGAMBE S. (1998), *L'albero flessibile. La cultura della progettualità*, Dunod Masson, Milano.
- TEUFFEL P. (2009), *Architectural Engineering and beyond*, Keynote Lecture of International Association for Shell and SPATIAL STRUCTURES (IASS) Symposium, Valencia, Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures, 28 September – 2 October, 2009, pp. 2430-2437.

- TIEZZI E. (1987), *Tempi storici. Tempi biologici*, Garzanti, Milano.
- TIEZZI E. (2001), *Tempi storici. Tempi biologici. Vent'anni dopo*, Donzelli, Roma.
- VITTORIA E. (1988) *Le teorie devianti dell'architettura*, in Marcello Fabbri, Daniela Pastore (a cura di), *Ambiente per il Terzo Millennio*, Olivetti, Roma.
- ZARELLI E. (1998), "Genius Loci - La cura della dimora. Il rito e l'identità nelle forme culturali dell'abitare", in *Un mondo di differenze. Il localismo tra comunità e società*, Arianna, Bologna.

#### *Sitografia*

CIB Agenda 21 on Sustainable Construction [www.cibworld.nl](http://www.cibworld.nl)  
[www.iisbe.org](http://www.iisbe.org)  
[www.inies.fr](http://www.inies.fr) – banca dati francese INIES relativa ai dati ambientali (EPD) e di durata di vita di materiali edili  
[www.greenbuilding.ca](http://www.greenbuilding.ca)  
[www.greenbuilder.com](http://www.greenbuilder.com)  
[www.sustainabledesignguide.umn.edu](http://www.sustainabledesignguide.umn.edu)  
[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) : <http://it.wikipedia.org/wiki/Flusso>

#### *Riferimenti normativi*

ASTM (American Society for Testing and Materials), *Building Maintenance, Repair and Replacement Database for Life Cycle Cost Analysis*, 1985 (e aggiornamenti al 1995)

ISO 14040, *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*

ISO 14041, *Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis*

ISO 14042, *Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment*

ISO 14050, *Environmental management - Vocabulary*

ISO 15686-1 (2000), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles*

ISO 15686-2 (2002), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 2: Service life prediction procedures*

ISO 15686-6 (2004), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 6: Procedures for considering environmental impacts*

ISO 15686-7 (2006), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice*

ISO 21930 (2005) *Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products (EBPD)*

ISO/TS 21929-1, *Sustainability in building construction - Sustainability indicators - Part 1: Framework for development of indicators for buildings*

UNI EN 1990 (2006) - *Criteri generali di progettazione strutturale*

UNI 11156 (2006) - *Valutazione della durabilità dei componenti edili - Parte 1 – Terminologia e definizione dei parametri di valutazione*

UNI 11156 (2006) - *Valutazione della durabilità dei componenti edili - Parte 2 – Metodo per la valutazione della propensione all'affidabilità*

UNI 11156 (2006) - *Valutazione della durabilità dei componenti edili - Parte 3 – Metodo per la valutazione della durata (vita utile)*

## Capitolo 2

### Nuovi approcci per il progetto di architettura ambientalmente responsabile

- ABEL C.A., EDWARDS K. L., ASHBY M. F. (1994), "Materials, processing and the environment in engineering design: The issues", in *Materials & Design*, Vol. 15, n. 4, pp. 179-193.
- AKTAR C. B., BILEC M. M. (2012), "Impact of lifetime on US residential building LCA results", in *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, n. 17, pp. 337-349.
- ALCORN A. (1998), *Embodied energy coefficients of building materials*, Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington, New Zealand.
- ALCORN A. (2003), *Embodied energy and CO2 coefficients for NZ building materials*, Centre for Building Performance Research, Victoria University of Wellington, New Zealand.
- ALTING D. L., JØRGENSEN D. J. (1993), *The Life Cycle Concept as a Basis for Sustainable Industrial Production*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 42, n. 1, pp. 163-167.
- ALTING D. L., LEGARTH J. B. (1995), *Life Cycle Engineering and Design*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 44, n. 2, pp. 569-580.
- ANDERSON J., THORNBACKE J. (2012), *A guide to understanding the embodied impacts of construction products*, Construction Products Association, 2012 (disponibile online su [www.constructionproducts-sustainability.org.uk](http://www.constructionproducts-sustainability.org.uk))
- ARDENTE et al. (2011), "Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, n. 1, pp. 460-470.
- ASDRUBALI F., BALDINELLI G., BATTISTI M., BALDASSARRI C. (2008), "Analisi ed ottimizzazione energetico-ambientale di un edificio mediante la valutazione del ciclo di vita (LCA)", in *Atti dell' 8° Congresso Nazionale CIRIAF - Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana*, Perugia, 4/5 aprile, Morlacchi Editore, Perugia.
- ASIF M., MUNEEB T., KELLEY R. (2007), "Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland", in *Building and Environment*, n. 42, pp. 1391-1394.
- AZARI-NA R., KIM Y. W. (2012), "Comparative assessment of life cycle impacts of curtain wall mullions", in *Building and Environment*, n. 48, pp. 135-145.
- BENDEWALD M., OLGAY V., YEANG K. (2010), "Green Footstep a tool for evaluating a building's life-cycle carbon footprint and informing carbon decisions during the building design process", in *Architectural Design - Special Issue: Territory: Architecture Beyond Environment*, Vol. 80, n. 3, John Wiley & Sons, pp. 126-129.
- BLENGINI G. A. (2009), "Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy", in *Building and Environment*, n. 44, pp. 319-330.
- BLENGINI G. A., DI CARLO T. (2010a), "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings", in *Energy and Buildings*, n. 42, pp. 869-880.
- BLENGINI G. A., DI CARLO T. (2010b), "Energy-saving policies and low-energy residential buildings: an LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy)", in *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, n. 15, pp. 652-665.
- BLOM I., ITARD L., MEIJER A. (2010), "LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings", in *Building and Environment*, n. 45, pp. 2362-2372.
- BOVEA M. D., GALLARDO A. (2004), "The influence of impact assessment methods on materials selection for eco-design", in *Materials and Design*, n. 27, pp. 209-215.
- BUTH C., ACHARD G., LE TENO J. F., CHEVALIER J. L. (1997), "Integration of the recycling



processes to the life cycle analysis of construction products”, in *Resources, Conservation and Recycling*, n. 20, pp. 227-243.

CASADEMONT TORRENTS X. (2007), “METABASE ITeC”, in *Information And Knowledge Management - Helping The Practitioner In Planning And Building*. Proceedings of the CIB W102 3rd International Conference, Stuttgart (Germany), Fraunhofer IRB Verlag, p. 423-429.

CHAN Y., R. J. RIES, Y. WANG (2010), “The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model”, in *Energy Policy*, n. 38, pp. 6597-6603.

CHEVALIER G. L., LE TFINOT (1996), “Requirements for an LCA-based Model for the Evaluation of the Environmental Quality of Building Products”, in *Building and Environment*, Vol. 31, n. 5, pp. 487-491.

CITHERLET S., DI GUGLIELMO F., GAY J. B. (2000), “Window and advanced glazing systems life cycle assessment”, in *Energy and Buildings*, n. 32, pp. 225-234.

COLLINGE W. O. et al. (2011), “Enabling Dynamic Life Cycle Assessment of Buildings with Wireless Sensor Networks”, in *IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*, 16-18 Maggio, Chicago, IL, USA.

CUÉLLAR-FRANCA R. M., AZAPAGIC A. (2012), “Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses”, in *Building and Environment*, n. 54, pp. 86-99.

EATON J. K., AMATO A. (1998), “A Comparative Life Cycle Assessment of Steel and Concrete Framed Office Buildings”, in *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 46, pp. 286-287.

ERLANDSSON M., BORG M. (2003), “Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs” in *Building and Environment*, n. 38, pp. 919-938.

ERLANDSSON M., BORG M. (2003), “Generic LCA-methodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs”, in *Building and Environment*, n. 38, pp. 919 – 938.

EUROPEAN COMMISSION - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010), *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps*, first edition March 2010, EUR 24708 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

EUROPEAN COMMISSION n - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010), *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, first edition March 2010, EUR 24378 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

EUROPEAN COMMISSION n - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010), *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators*, First edition March 2010, EUR 24586 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

FINNVEDEN G. (1997), “Valuation Methods Within LCA – Where are the Values?” in *International Journal of LCA*, n. 2, pp. 163 – 169.

GOEDKOOP M., SPRIENSMA R. (2000), *The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment*, Methodology Report, second edition, Pré Consultant, Amersfoort, NL.

GOGGIN P. A. (1994), “An appraisal of ecolabelling from a design perspective”, in *Design Studies*, Vol. 15, n. 4, Ott., pp. 459-477

GUINÉE J.B. et alii (2002), *Life Cycle Assessment : an operational guide to the ISO Standards*,

- Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.
- HAAPIO A., VIITANIEMI P. (2008), "Environmental effect of structural solutions and building materials to a building", in *Environmental Impact Assessment Review*, n. 28, pp. 587–600.
- HAMMOND G., JONES C. (2008), *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, University of Bath, Sustainable Energy Research Team (SERT), Dept. of mechanical Engineering, consultabile in [web.mit.edu/2.813/www/readings/ICE.pdf](http://web.mit.edu/2.813/www/readings/ICE.pdf) e in [www.bath.ac.uk/mech/sert/embodied/](http://www.bath.ac.uk/mech/sert/embodied/)
- HAUSCHILD M., WENZEL H. (1998), *Environmental Assessment of Products – Vol 2: Scientific Background*, Chapman & Hall, London.
- HOLLOWAY L., CLEGG D., TRANTER I., G. COCKERHAM (1994), "Incorporating environmental principles into the design process", in *Materials & Design*, Vol. 15, n. 5, pp. 259–267.
- IYER-RANIGA U., POW CHEW WONG J. (2012), "Evaluation of whole life cycle assessment for heritage buildings in Australia", in *Building and Environment* n.47, pp. 138–149.
- JÖHSSON A. (2000), "Tools and methods for environmental assessment of building products-methodological analysis of six selected approaches", in *Building and Environment*, Vol. 35, pp. 223–238.
- JOLLIER O. et alii (2003a), *LCIA Definition Study of the SETAC-UNEP Life Cycle initiative*, UNEP, <http://www.unep.org/pc/sustain/lcinitiative/>.
- JOLLIER O. et alii (2003b), "IMPACT 2000+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology", in *International Journal of LCA*, n. 8 (6), pp. 324 – 330.
- KIM K. H. (2011), "A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system", in *Energy and Buildings*, n. 43, pp. 3436–3445.
- KLÖPFER W. (1998), "Subjective is not Arbitrary", Editorial in *International Journal of LCA*, n. 3 (2), pp.61–62.
- KOFOWOROLA O. F., SHABBIR H. G. (2008), "Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand", in *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, n. 13, pp. 498–51.
- KORONEOS C., DOMPROS A. (2007), "Environmental assessment of brick production in Greece", in *Building and Environment*, n. 42, pp. 2114–2123.
- KORONEOS C., KOTTAS G. (2007), "Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki—Greece", in *Building and Environment*, n. 42, pp. 122–138.
- KOSAREO L., RIES R. (2007), "Comparative environmental life cycle assessment of green roof", in *Building and Environment*, n. 42, pp. 2606–2613.
- LAVAGNA M. (2008), *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano.
- LAVAGNA M. (2009), "La valutazione ambientale degli edifici", in Bertoldini M., Campioli A. (a cura di) *Cultura tecnologia e ambiente*, Città Studi, Novara.
- LEE K., TAE S., SHIN S. (2009), "Development of a Life Cycle Assessment Program for building (SUSB-LCA) in South Korea", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n. 13, pp. 1994–2002.
- LENZEN M., TRELOAR G. (2002), "Embodied energy in buildings: wood versus concrete - reply to Börjesson and Gustavsson", in *Energy Policy*, n.30, pp. 249–255.
- LI Z. (2006), "A new life cycle impact assessment approach for buildings", in *Building and Environment*, n. 41, pp. 1414–1422.
- LIN S. L. (2003), "LCA-based energy evaluating with application to school buildings in Taiwan", in *Proceedings of Design 2003 - Third International Symposium on Environmentally*

*Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan, 8-11 December.

MAHDAVI A., RIES R. (1998), "Towards computational eco-analysis of building designs" in *Computers & Structures*, n. 76, pp.375-387.

MALMQVIST T. et al. (2011), "Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines", in *Energy*, n. 36, pp. 1900-1907.

MATTHEWS H. S., MCMICHAEL F., LAVE L., MACLEAN H. (2001), "Life Cycle Analysis as a Tool for Product Design" in *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier Science Ltd., Oxford U.K.

MEADOWS D.H., MEADOWS D.L., RANDERS J., BEHRENS W.B. (1972), *The limits to growth*, Pan Books (ed. italiana (1972) *I limiti dello sviluppo*, Mondadori, Milano)

MILLET D., BISTAGNINO L., LANZAVECCHIA C., CAMOUS R., POLDMA T. (2007), "Does the potential of the use of LCA match the design team needs?", in *Journal of Cleaner Production*, n. 15, pp. 335-346.

MONAHAN J., POWELL J. C. (2011), "An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework", in *Energy and Buildings*, n. 43, pp. 179-188.

MONTEIRO H., FREIRE F. (2012), "Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods", in *Energy and Buildings*, n. 47, pp. 572-583.

MONTICELLI C. (2006), *Processo edilizio e qualità ambientale. Potenzialità a limiti della metodologia LCA applicata a soluzioni d'involucro sperimentali*, Dottorato di ricerca in Tecnologia e progetto per la qualità ambientale a scala edilizia e urbana, XVIII ciclo, presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'ambiente costruito BEST.

MYER A., CHAFFEE C. (1997), "Life-Cycle Analysis for design of the Sydney Olympic Stadium", in *Renewable Energy*, Vol. 10, n. 213, pp. 169-172.

NEBEL B., Zimmer B., Wegener G. (2006), "Life Cycle Assessment of Wood Floor Coverings. A Representative Study for the German Flooring Industry", in *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, vol.11, n. 3, pp. 172-182.

NERI P. (a cura di) (2008), *Verso la valutazione ambientale. LCA a supporto della progettazione ecosostenibile*, Alinea, Firenze.

NICOLETTI G. et al. (2002), "Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: ceramic versus marble tiles", in *Journal of Cleaner Production*, n. 10, pp. 283-296.

NIKLAUS K., KLINGELE M., HEITZ S., HERMANN M., KOCH M. (1997), "Simulation of energy and mass flows of buildings during their life cycle", in atti della Conferenza internazionale *Assessment methods, natural resources. Vol 2, Environmental management, environmental strategies - Buildings and the environment*, Parigi, 9 giugno, pp. 41-48.

ORTIZ O. et al. (2009), "Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain", in *Building and Environment*, n. 44, pp. 584-594.

ORTIZ O., CASTELLS F., SONNEMANN G. (2009), "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA", in *Construction and Building Materials*, n. 23, pp. 28-39.

ORTIZ-RODRÍGUEZ O., CASTELLS F., SONNEMANN G. (2010), "Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development", in *Science of the Total Environment*, n. 408, pp. 2435-2443.

OTTELÉ M. et al. (2011), "Comparative life cycle analysis for green facades and living wall

- systems", in *Energy and Buildings*, n.43, pp.3419–3429.
- PEHNT M. (2006), "Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies", in *Renewable Energy*, n. 31, pp. 55–71.
- PEREZ FERNANDEZ N. (2008), *The influence of construction materials on life-cycle energy use and carbon dioxide emissions of medium size commercial buildings*, tesi di laurea in Building Science, School of Architecture, Victoria University of Wellington, Nuova Zelanda.
- PETERSEN A. K., SOLBERG B. (2005), "Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden", in *Forest Policy and Economics*, n. 7, pp. 249-259.
- PEUPORTIER B. L. P. (2001), "Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context", in *Energy and Buildings*, n. 33, pp. 443-450.
- POLSTER B. et alii (1996), "Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design" in *Solar Energy*, Vol. 57, n. 3, pp. 219-230.
- POTTING J., BLOCK K. (1995), "Life-Cycle Assessment of four types of floors", in *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3, n. 4, pp. 201-213.
- ROSSI B., MARIQUE A. F., REITER S. (2012), "Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study", in *Building and Environment*, n. 51, pp. 402-407.
- SCHUURMANS-STEHMANN A. M. (1994), "Environmental life cycle analysis of construction products with and without recycling", in Aalbers Th.G., van der Sloot H.A., Goumans J.J.J.M. (a cura di) *Environmental Aspects of Construction with Waste Materials*, pp. 709 – 718.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (1993), Definizione di analisi del ciclo di vita di un manufatto, Congresso di Vermont, Canada.
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (1993), *Definizione di analisi del ciclo di vita di un manufatto*, Congresso di Vermont, Canada.
- STEEN B. (1999), *A systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS) 2000 General System Characteristics & 2000 Models and Data*, Chalmers, Svezia (consultabile su <http://eps.esa.chalmers.se/download.htm>).
- THIERS S., PEUPORTIER B. (2012), "Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings", in *Building and Environment*, n. 51, pp. 276-284.
- THORMARK C. (2002), "A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential", in *Building and Environment*, n. 37, pp. 429 – 435.
- TIEZZI E., PULSELLI F. M., NICOLUCCI V. (2010), *La Misura della Sostenibilità: Impronta Ecologica e aspetti economico energetici della sostenibilità*, Università degli studi di Siena.
- VAN DEN DOBBELSTEEN A. (2002), "Defining the reference for environmental performance", in M. Anson, J.M. Ko, E.S.S. Lam (eds.) (2002), *Advances in Building Technology*, Elsevier Science, pp. 1509-1516.
- VARUN et al. (2012), "Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: A case study", in *Sustainable Cities and Society*, n. 4, pp. 22-28
- VERBEECK G., HENS H. (2010), "Life cycle inventory of buildings: A calculation method", in *Building and Environment*, n. 45, pp. 1037–1041.
- WU H. J. et al. (2012), "Life cycle energy consumption and CO2 emission of an office building in China", in *Int. Journal of Life Cycle Assessment*, n. 17, pp. 105–118.

ZHANG Z., WUA X., YANGA X., ZHUB Y. (2006), "BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model", in *Building and Environment*, n. 41, pp. 669–675.

#### *Riferimenti normativi*

Regolamento UE 1836/93 (*ecoManagement and Auditing scheme – EMAS*) - *Sistemi di Gestione Ambientale dei processi*

Regolamento UE 880/92 (*Ecolabel*) - *Sistemi di Gestione Ambientale dei prodotti*

Norme Ambientali ISO 14000

ISO 14031:1999 *Gestione Ambientale – Valutazione delle Performance Ambientali – Linee guida*

ISO 14032:1999 *Gestione Ambientale – Esempi di Valutazione delle Performance Ambientali*

ISO 14040:2006 (*Life Cycle Assessment*) o *Analisi del Ciclo di Vita, LCA, di un prodotto o servizio o di qualunque attività*

ISO 14025:2006 *Environmental labels and declarations -- Type III environmental declarations -- Principles and procedures*

ISO 21930:2007 *Sustainability in building construction -- Environmental declaration of building products - Sostenibilità nel settore delle costruzioni – Dichiarazione ambientale dei prodotti edilizi.*

UNI EN ISO 14001:1996 - *Sistemi di Gestione Ambientale – Requisiti e guide per l'uso*

UNI ISO 14004:1997 - *Sistemi di Gestione Ambientale – Linee guida generali su principi, sistemi e tecniche di supporto*

UNI EN ISO 14010:1996 - *Linee guida per l'Audit Ambientale – Principi Generali*

UNI EN ISO 14025:2010 - *Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*

CEN/TR 15941:2010 - *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Methodology for selection and use of generic data*

EN 15643-1:2010 - *Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1: General framework*

EN 15643-2:2011 - *Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance*

EN 15643-3:2012 - *Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 3: Framework for the assessment of social performance*

EN 15643-4:2012 - *Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 4: Framework for the assessment of economic performance*

EN 15804:2012 - *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*

EN 15942:2011 - *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Communication format business-to-business*

EN 15978:2011 - *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*

#### *Sitografia*

[www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/](http://www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/)

[www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)

[www.bre.co.uk/envprofiles](http://www.bre.co.uk/envprofiles)

[www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)

[www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com)  
[www.grantadesign.com/education/overview.htm](http://www.grantadesign.com/education/overview.htm)  
[www.idemat.nl](http://www.idemat.nl)  
[www.inies.fr](http://www.inies.fr)  
[www.itaca.org/valutazione\\_sostenibilita.asp](http://www.itaca.org/valutazione_sostenibilita.asp)  
[www.itec.es/noumetabase2.c/consultes.aspx](http://www.itec.es/noumetabase2.c/consultes.aspx)  
[www.ivam.uva.nl](http://www.ivam.uva.nl)  
<http://lca.jrc.ec.europa.eu>  
<http://lcinitiative.unep.fr>

### Capitolo 3

#### Ciclo di vita del componente e ottimizzazione nell'uso della materia

- AIDA S., FUNAKI A. (2008), *Fluorocopolymer film and its applications*, US patent application no. 11/430054, [www.freepatentsonline.com](http://www.freepatentsonline.com).
- AGC Chemicals Europe (2008), *ETFE films "Green Credentials"*, Amsterdam, (reference received from Vector Foiltec GmbH, Bremen).
- ASHBY M. (2007), *Materials engineering, science, processing and design*, Elsevier, Oxford, p. 167.
- CHILTON J., S. A. PEZESHKZADEH, AFRIN S. (2013), "Embodied energy in ETFE foil construction", in *[RE]THINKING Lightweight Structures Tensinet Symposium 2013*, 8 -10 May 2013, Istanbul, pp.457-466
- 2002/91/CE Directive from the EU Parliament and Council "EPBD, Energy Performance of Buildings Directive" (16 December 2002).
- COMMISSIONE EU (2007), L. 61/47 del 26 febbraio 2007, DECISIONE DELLA COMMISSIONE che autorizza una deroga temporanea all'articolo 4, paragrafo 3, e all'articolo 5, paragrafo 1, del regolamento (CE) n. 2037/2000 del Parlamento europeo e del Consiglio sulle sostanze che riducono lo strato di ozono, per quanto riguarda l'immissione sul mercato di HCFC-225cb per la produzione di fluoropolimeri, 27/139/CE.
- ECOINVENT V2.1, *Swiss center for the Life Cycle Inventories*, [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch)
- FERNANDEZ J. (2006), *Materials Architecture. Emergent materials for innovative buildings and ecological construction*, Elsevier, Oxford. p. 169.
- FREI O. (2004), "Foreword: On the Way to an Architecture of the Minimal", in Brian Forster, Marijke Mollaert, *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, Tensinet Edition, Brussel, pp. 6-7.
- FREI O. (2004), "Prefazione: verso un'architettura minimale", in Alessandra Zanelli a cura di, *Progettare con le membrane*, Maggioli Editore, 2007, pp. 5-6 (traduzione di: Brian Forster, Marijke Mollaert, *European Design Guide for Tensile Surface Structures*, Tensinet Edition, Brussel, 2004).
- KNIPPERS J. et alii (2011), *Construction Manual for Polymers + Membranes*, Birkhauser Verlag AG, Basel.
- LECUYER A. (2008), *ETFE. Technology and Design*, Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2008, p. 32.
- LILI S., ZHONGFU X., ZHONGBAO J. (2005), "Charge storage and its dynamic characteristic of ETFE film electrets", 12th International Symposium on Electrets, ISE 12, Bahia, Brazil.
- MONTICELLI C. (2009), "Characterization of the environmental performance of new build-

ing materials for architecture: the case of the envelope membranes made of etfe”, tutor A. Campioli, co-tutor A. Zanelli, Polytechnic of Milan Dept. BEST, with financial support of Fratelli Confalonieri Foundation (Milan), May 2008-April 2009.

MONTICELLI C., CAMPIOLI A., ZANELLI A. (2009), “Environmental load of ETFE cushions and future ways for their self-sufficient performances”, in *Evolution and Trends in Design, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Editorial Universitat Politècnica de Valencia, Spain, pp. 754-766.

MORITZ K., BARTHEL R. (2002), “Transparente Architektur – Bauen mit ETFE Folien”, in *Detail*, n. 12, pp.1617 – 1620.

MORITZ K., BARTHEL R. (2004), “Building with ETFE sheeting”, in Kaltenbach F., *Translucent Materials: Glass Plastic Metals*, Munich: Architektur-Dokumentation GmbH & CoKG, pp. 70-78.

PEARSON A. (2000), “Clear choices”, in *Building*, 21.

PONZONI L. (2008), *La sostenibilità della trasparenza. Valutazione ambientale comparativa tra un sistema di copertura pneumatico e uno vetrato secondo la metodologia LCA*, febbraio 2008, (relatore Alessandra Zanelli, correlatrice Carol Monticelli), Tesi di Laurea in Architettura Ambientale, Prima Facoltà di Architettura, Politecnico di Milano.

RICE G., CLIFT R., BURNS R. (1997), “LCA software review”, in *International Journal of LCA*, 2, pp.53-59.

ROBINSON-GAYLE S., KOLOKOTRONI M., CRIPPS A., TANNO S. (2001), “ETFE foil cushions in roofs and atria”, in *Construction and Building Materials*, n. 15, pp. 323-327.

RUDORF-WITRIN W. (2007), “ETFE – FOIL: a New Material for Textile Architecture”, in Bögnér-Balz H., Zanelli A. (edited by), *TensiNet Symposium 2007 Ephemeral Architecture*. Time and Textiles, Clup, 329-337.

SCHWITTER C. (1994), “Use of ETFE foils in lightweight constructions”, Proceedings of the IASS-ASCE Symposium 1994 on Spatial, Lattice and Tension Structures.

ZANELLI A. (2009), “Leggerezza e sostenibilità ambientale: convergenze nel progetto”, in Campioli A., Bertoldini M., *Cultura tecnologica e ambiente*, Città studi, Novara.

ZANELLI A., MONTICELLI C., BECCARELLI P. e MOHAMED IBRAHIM H. (2011), “Experimental manufacture of a pneumatic cushion made of etfe foils and opv cells”, in International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures STRUCTURAL MEMBRANES 2011, edited by E. Oñate, B. Kröplin and K.-U.Bletzinger - CIMNE, Barcelona, 5-7 ottobre 2011, p. 279-290.

SANTORO A. M. (2008), [http://www.chem.unep.ch/unepsaicm/cheminprod\\_dec08/PFCWorkshop/Presentations/MSantoro%20-%20Session%204%20-%20PFC%20Alternatives%20Activity%20at%203M.pdf](http://www.chem.unep.ch/unepsaicm/cheminprod_dec08/PFCWorkshop/Presentations/MSantoro%20-%20Session%204%20-%20PFC%20Alternatives%20Activity%20at%203M.pdf)

[www.dyneon.com/ADONA](http://www.dyneon.com/ADONA)

## Capitolo 4

### Ciclo di vita dell’edificio e contenimento dei consumi energetici

Aa.Vv. (2008), *La durabilità dei componenti edilizi - The durability of building components*, ediTecnica, Palermo.

ADALBERTH K. (1997), “Energy use during the life Cycle of Building: a Method”, in *Building and Environment*, n. 4, vol. 32, pp. 317-320.

- ALBANO J. (2008) *La manutenzione degli edifici: 250 schede pratiche*, edizione italiana a cura di C. Talamo, Esselibri-Simone, Napoli.
- ASAN H., "Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view", in *Energy and Buildings*, n. 32, 2000, pp. 197-203.
- ASTM (American Society for Testing and Materials) (1985), *Building Maintenance, Repair and Replacement Database for Life Cycle Cost Analysis*, (e aggiornamenti al 1995)
- BRE (British Research Establishment) (2009), *Green Guide BRE*, London, basata sul *BLP Construction Durability Database*;
- BOMA (Building Owners and Manager Association) (1992), *Preventive maintenance guide*, BOMA International, New York
- BOMA (Building Owners and Manager Association) (1996), *How to Design & Manage Your Preventive Maintenance Program*, Boma International, New York.
- BRAND S. (1994), *How building learn*, Penguin Books, New York.
- DANIOTTI B. (a cura di) (2006), *La valutazione della durabilità di pareti perimetrali verticali non portanti*, ediTecnica, Palermo.
- DELL'ISOLA A.J., KIRK S.J. (1982-83), *Life cycle cost data*, McGraw-Hill, New York, (con aggiornamento al 1995).
- FLAGGER F. (2003), *The Design of Building Structures for Improved Life-Cycle Performance*, MIT Press, Boston.
- HAMMOND G. & JONES C., *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, University of Bath, *Sustainable Energy Research Team (SERT), Dept. of mechanical Engineering*.
- HAPM (Housing Association Property Mutual) (1996), *Component Life Manual* (4° edizione), E & F.N. Spon, London,
- KORNMANN M. (2009), *Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie » - Étude bibliographique des avis d'experts*, rapporto di ricerca, CTMNC, Parigi.
- HEV (2005), Associazione Svizzera Inquilini (MV) e dall'Associazione dei Proprietari Immobiliari, *Tabella della durata di vita*, (SMV, Massagno, Svizzera);
- INIES - *Base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction*, <http://www.inies.fr>;
- MONTICELLI C., RE CECCONI F., PANSA G., MAININI A. (2011), *Influence of degradation and service life of construction materials on the embodied energy and the energy requirements of buildings*, in XII DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Porto, 12-15 aprile 2011, vol.4
- PERRET J. (1995), *Guide de la maintenance des batiments*, Le Moniteur, Paris, traduzione italiana a cura di Talamo C., *Guida alla manutenzione degli edifici*, Maggioli, Rimini, 2001.



## Capitolo 5

### Ciclo di vita dell'edificio e riduzione degli impatti ambientali

- YEANG K. (2006), *Ecodesign - A manual for ecological design*, Wiley & Sons Ltd, New York.
- BLANCHARD S., REPPE P. (1998), *Life Cycle Analysis of a Residential Home in Michigan*, University of Michigan.
- VAN DEN DOBBELSTEEN A. (2002), "Defining the reference for environmental performance", in M. Anson, J.M. Ko, E.S.S. Lam (eds.), *Advances in Building Technology*, Elsevier Science, pp. 1509-1516
- PRÉ (Product ecology consultants) (2001), *The ECO- Indicator 99, a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment - Methodology Report*, Holland.
- WIENKE U. (2002), *L'edificio passivo, Standard – Requisiti – Esempi*, Alinea, Firenze.

## FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI

*Laddove nelle figure o nelle tabelle non è indicata la fonte si fa riferimento a elaborazioni dell'autore.*

- Cap. 1 Fig. 1-7: ISO 15686-6 (2004), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 6: Procedures for considering environmental impacts*.
- Cap. 1 Fig. 1-8: ISO 15686-7 (2006), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice*.
- Cap. 1 Fig. 1-9: LUCIUK M. (2007), *Durability and Life Cycle Analysis*, Morrison Hershfield Limited, Canada.
- Cap. 1 Fig. 1-10: ASSOCIAZIONE SVIZZERA INQUILINI (MV) E DALL'ASSOCIAZIONE DEI PROPRIETARI IMMOBILIARI (HEV Schweiz) (2005), *Tabella della durata di vita*, SMV, Massagno, Svizzera.
- Cap. 1 Fig. 1-11: Foto di Carol Monticelli (destra) e RUGGIERO R. (2009), 01\_“ Architettura/Tecnica/Costruzione”, dispensa del Laboratorio di Costruzione dell'Architettura, Progettazione dei Sistemi Costruttivi, Scuola di Architettura e Design “Eduardo Vittoria”, Corso di Laurea in Scienze dell'Architettura, AA 2009/2010 (sinistra).
- Cap. 1 Tab. 1-1: [www.inies.fr](http://www.inies.fr) (2009) – banca dati francese INIES relativa ai dati ambientali (EPD) e di durata di vita di materiali edili
- Cap. 1 Tab. 1-2: elaborazione dell'autore da RIZZI F. (2002), “The lifespan of Buildings in the United Kingdom”, in *Architectural Institute of Japan*, n. 1494, vol. 117, pp. 10-11.
- Cap. 1 Tab. 1-3: UNI EN 1990 (2006) - *Criteri generali di progettazione strutturale*.
- Cap. 1 Tab. 1-4: Rapporto EOTA, 1999
- Cap. 1 Tab. 1-5: ISO 15686-7 (2006), *Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice*.
- Cap. 1 Tab. 1-6: KORNMAN M. (2009), *Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie » - Étude bibliographique des avis d'experts*, rapporto di ricerca, CTMNC, Parigi.
- Cap. 2 Fig. 2-2: HAMMOND G., JONES C. (2008), *Inventory of Carbon & Energy (ICE) – Version 1.6a*, University of Bath, Sustainable Energy Research Team (SERT), Dept. of mechanical Engineering, consultabile in [web.mit.edu/2.813/www/readings/ICE.pdf](http://web.mit.edu/2.813/www/readings/ICE.pdf) e in [www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/](http://www.bath.ac.uk/mech/eng/sert/embodied/)
- Cap. 2 Fig. 2-3: [www.bre.co.uk/envprofiles](http://www.bre.co.uk/envprofiles), 2013
- Cap. 2 Fig. 2-4: [www.inies.fr](http://www.inies.fr), 2013
- Cap. 2 Fig. 2-5: Institut Bauen und Umwelt e.V., Germania, [www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)
- Cap. 2 Fig. 2-6: EPD, Environdec, Svezia, [www.environdec.se](http://www.environdec.se)
- Cap. 2 Fig. 2-7: Institut Bauen und Umwelt e.V., Germania, [www.dgnb.de](http://www.dgnb.de)
- Cap. 2 Tab. 2-4: MONTICELLI C. (2006), *Processo edilizio e qualità ambientale. Potenzialità a limiti della metodologia LCA applicata a soluzioni d'involucro sperimentali*, Dottorato di ricerca in Tecnologia e progetto per la qualità ambientale a scala edilizia e urbana, XVIII ciclo, presso il Politecnico di Milano, Dipartimento di Scienza e Tecnologie dell'ambiente costruito BEST.
- Cap. 3 Fig. 3-1: MONTICELLI C. (2009), “Characterization of the environmental performance of new building materials for architecture: the case of the envelope membranes made of etfe”, tutor A. Campioli, co-tutor A. Zanelli, Polytechnic of Milan Dept. BEST, with financial support of Fratelli Confalonieri Fondazione (Milan), May 2008-April 2009.

- Cap. 3 Fig. 3-2: LECUYER A. (2008), *ETFE. Technology and Design*, Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2008, p. 32.
- Cap. 3 Fig. 3-3: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-4: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-5: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-6: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-7: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-8: MONTICELLI C. (2009), "Characterization of the environmental performance of new building materials for architecture: the case of the envelope membranes made of etfe", tutor A. Campioli, co-tutor A. Zanelli, Polytechnic of Milan Dept. BEST, with financial support of Fratelli Confalonieri Foundation (Milan), May 2008-April 2009.
- Cap. 3 Fig. 3-11: MONTICELLI C. (2009), "Characterization of the environmental performance of new building materials for architecture: the case of the envelope membranes made of etfe", tutor A. Campioli, co-tutor A. Zanelli, Polytechnic of Milan Dept. BEST, with financial support of Fratelli Confalonieri Foundation (Milan), May 2008-April 2009.
- Cap. 3 Fig. 3-12: documentazione fornita dallo studio di progettazione Studio Herzog & Partners
- Cap. 3 Fig. 3-13: documentazione fornita dallo studio di progettazione Studio Herzog & Partners
- Cap. 3 Fig. 3-14: foto di Carol Monticelli
- Cap. 3 Fig. 3-15: documentazione fornita dallo studio di progettazione Willen Associates Architekten.
- Cap. 3 Fig. 3-16: PONZONI L. (2008), *La sostenibilità della trasparenza. Valutazione ambientale comparativa tra un sistema di copertura pneumatico e uno vetrato secondo la metodologia LCA*, febbraio 2008, (relatore Alessandra Zanelli, correlatrice Carol Monticelli), Tesi di Laurea in Architettura Ambientale, Prima Facoltà di Architettura, Politecnico di Milano.
- Cap. 3 Fig. 3-17: PONZONI L. (2008), *La sostenibilità della trasparenza. Valutazione ambientale comparativa tra un sistema di copertura pneumatico e uno vetrato secondo la metodologia LCA*, febbraio 2008, (relatore Alessandra Zanelli, correlatrice Carol Monticelli), Tesi di Laurea in Architettura Ambientale, Prima Facoltà di Architettura, Politecnico di Milano.
- Cap. 5 Fig. 5-1: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. arch. Ettore Zambelli.
- Cap. 5 Fig. 5-2: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. arch. Ettore Zambelli.
- Cap. 5 Fig. 5-3: documentazione progettuale fornita dallo studio di progettazione AIACE. arch. Ettore Zambelli.
- Cap. 5 Fig. 5-4: foto di Carol Monticelli.
- Cap. 5 Fig. 5-5: foto di Carol Monticelli.
- Cap. 6 Fig. 6-1: Aa.Vv., *Minihäuser Japan*, Verlag Anton Puster Salzburg, Salisburgo, 2000.
- Cap. 6 Fig. 6-2: Documentazione fornita da Canobbio S.p.a., Castelnuovo Scrivia, AL, [www.canobbio.com](http://www.canobbio.com).
- Cap. 6 Fig. 6-3: Pagliari F. (2009), "Wall House", in *The Plan*, n.36, pp. 86-94, Zanelli A. (2008), "Membrane e Scocche", in *Arketipo*, n.27, pp.58-69, [www.f-a-r.net](http://www.f-a-r.net).
- Cap. 6 Fig. 6-4: Masotti C. (2010), *Manuale di architettura di emergenza e temporanea*, Sistemi Editoriali, [www.containercity.com](http://www.containercity.com).
- Cap. 6 Fig. 6-5: Masotti C. (2010), *Manuale di architettura di emergenza e temporanea*, Sistemi Editoriali, [www.spacebox.nl](http://www.spacebox.nl).
- Cap. 6 Fig. 6-5: Masotti C. (2010), *Manuale di architettura di emergenza e temporanea*, Sistemi Editoriali, [www.microcompacthome.com](http://www.microcompacthome.com).
- Cap. 6 Fig. 6-7: DTI (*Danish Technological Institute*), "Results of the EU Demohouse research project" in paper pubblicato 05/2008, [www.ecobuilding-club.net](http://www.ecobuilding-club.net)

- Cap. 6 Fig. 6-8: Masotti C. (2010), *Manuale di architettura di emergenza e temporanea*, Sistemi Editoriali, [www.cibicpartners.com](http://www.cibicpartners.com).
- Cap. 6 Fig. 6-9: Materiale fornito da Casa Zero Energy, [www.casazeroenergy.net](http://www.casazeroenergy.net).
- Cap. 6 Fig. 6-10: Giurdanella V, Superbi G., Viscuso S., Zanelli A., *Assemblage, la libertà costruttiva*, Gruppo Sole 24 Ore, Milano, [www.2012architecten.nl](http://www.2012architecten.nl).



**INDICE DEI NOMI E LUOGHI**

*I numeri in tondo si riferiscono ad una citazione nel testo. I numeri in corsivo indicano una citazione nelle didascalie delle tavole. In questo indice non sono riportati i nomi e i luoghi citati nei riferimenti bibliografici.*

**A**

2012Architecten 216  
Aeroporto Stansted, Londra 103, *103*, *104*  
AP - Acidification Potential 75,94, 108, *161*  
Aktiengesellschaft Declaration number EPD-STO-2011331-E 65  
AFNOR - Association Française de Normalization 31  
Agenda 21 15  
ANDIL 132  
Approved Environmental Profile 31  
Ariel VI  
Arnheim 101, 105  
Assessment of working life of products 49  
Assumption of working life of Construction Products 49  
ASTM (american Society for Testing and Materials) 33, 124, 144  
ATE 49  
Aura House 209, *210*  
Azienda 3M VI

**B**

Ban Shigheru 21  
BCIS - Building Cost Information Centre 34  
BIM Building Information Modeling 8  
BLP - BuildingLifePlan 34  
BLP - Building services component life manual 34  
BLP - Construction Durability Database 124  
BPG - Building fabric component life manual 34  
BOMA (Building Owners and Manager Association) 124, 144  
Bolzano 30  
BRE - British Research Establishment 31, 46, 60, 124, 144  
BRE - Certification Limited 61, 63  
BREEAM - BRE Environmental Assessment Method 54  
Bremen 102  
Building Element Life Expectancy Guidelines 34  
Building Performance group Ltd 34  
Burgers' Zoo 101  
Butera P. F 20  
BUWAL 250 60

**C**

CAGBC - Canadian Green Building Challenge 27  
Canada 26  
Canobbio S.p.a. 210  
Casa Zero Energy 214, 216  
CASBEE 54  
CE, marcatura 21, 30, 31, 49, 132  
CEE 1989 47  
CEN 30, 47  
CEN/TC 350- Sustainability of construction works 56, 63  
CEN/TR 15941:2010 63  
Centre for Whole Life Performance 46  
Centro Euro-mediterraneo per i cambiamenti climatici 39  
Chelsea and Westminster Hospital 101, 102, 102  
Christchurch 22  
Cibic&Partenrs 214  
CISBSE - Chartered Institution of Building Services Engineers 31  
CMHC 34  
CML 83  
CNR 39  
Commissione Europea 55, 99  
Construction Product Regulation – CPR (EU) No. 305/2011 56  
Container City 211, 212  
Copenhagen VI  
Le Corbusier 37, 38  
Cotto San Michele Srl. 65  
CPD - Direttiva dei Prodotti da Costruzione 30, 49  
CSTB 31

**D**

Danimarca 214  
DataArchive 60  
Dall'Isola A.J. 124, 144  
Declaration number EPD-VND-2011111-E 64  
Decreto della Regione Lombardia n. 5018 del 11.06.2007 e s.m.i. 150, 152  
Decreto n. 5796 150, 152  
Delft University of Technology, Department of Industrial Design Engineering 60  
DfD - Design for Disassembling 43  
DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen 63  
Dichiarazione di Malmö (2000) 83  
DIN 4108 110  
Dipartimento BEST 132, 163  
Dipartimento di ricerche per l'ambiente della University of Amsterdam UvA 60  
Direttiva 2002/91/CE IV, 96  
Direttiva Prodotti da Costruzione 89/106 56  
D.Lgs. n. 192/05 e s.m.i. 110, 131, 132, 134  
D.Lgs. 311/06, art. 6, comma 9 131, 132  
Dogtrot 214

Durabilità e la Direttiva dei prodotti da Costruzione 47  
Durabilité comparée de la construction à ossature bois et de la maçonnerie 33, 49  
Dubai, Palm Island 21

## E

E & F.N. Spon 124  
EBPD - Environmental Product Declaration 30  
ECA (Aquatic Ecotoxicity) 74  
Eco-bau 54  
Ecoindicator99 71, 83, 180, 182, 186, 187, 188, 190, 201, 203  
Ecoinvent 68, 162  
Ecoinvent V1.02 97, 106  
Ecoinvent V.3 60  
ECT (Terrestrial Ecotoxicity) 74  
EDIP (Environmental Design of Industrial Products) 83, 84  
EDIP96 79, 84, 161, 181, 184, 193  
EDIP96 (only resources) 181, 185, 194  
EDIP2003 79  
Eidgenössische Technische Hochschule 60  
ELCD core database version 1.0.1 60  
Embodied Energy 94, 97, 108, 122, 136, 140, 141, 147, 148, 149  
Embodied Carbon 136  
EMPA - Swiss Federal Laboratories for Material and Science Technology 60  
EN 15804:2012 63, 77  
EN 1990 - Basis of structural design 49  
EN 21390 EPD 108  
ENEA - Centro Ricerche 59  
Environdec 63  
Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 65  
Environmental Product Declaration in accordance with ISO 14025 TEXLON® System 64  
EOTA 47, 49, 50  
EOTA Guidance document 002 /edition December 1999 49  
EPD – Environmental Product Declaration 62, 63, 65, 67, 110, 111, 117  
EPD 2007 96, 107  
EPD 2007 (Draft version) 1.02 95  
EP-LCA - European Platform on Life Cycle Assessment 60  
EPS 83  
EPS 2000 84, 84, 161, 181, 183, 191, 192  
ESO - Evolutionary Structural Optimizazion 8  
ETA - European technical approval 30, 49  
ETH - Ecole polytechnique de Zurich 34, 60, 69  
ETH-ESU 60, 162  
Europa 55, 97  
Eutrophication Potential 94, 108, 161

## F

FAR Frohn & Rojas 209  
F.O.B.A 209



Fondazione Don Leandro Rossi – Famiglia Nuova 163  
Foster Norman & Partner 103, 103, 104  
Francia 31, 85  
Francoforte, Germania 209  
FRANKLIN US LCI 60

## G

GBTool 54  
Germania 31, 85, 102  
Ginevra 99  
Glaser 131, 134  
Global Warming Potential, GWP 74, 94, 108, 161  
Gran Bretagna 31  
Green Building Challenge 54  
Green Guide 31  
Green Star 54  
Guidelines for European Technical Approval 49

## H

Haack + Kopfner 211  
Hammond G. & C. Jones 60, 132, 136  
Hannover 103, 112, 113, 117, 119  
HAPM (Housing Association Property Mutual) 124, 144  
HAPM - Component life manual 34  
HCA (Human toxicological Classification value for Air) 75  
HCS (Human toxicological Classification value for Soil) 75  
HCW (Human toxicological Classification value for Water) 75  
Herzog Thomas 112  
HEV - Associazione Svizzera Inquilini e Associazione dei Proprietari Immobiliari 124, 144  
HEV Schweiz 31  
Holzstrasse Building Complex 112, 113, 114, 116, 118, 119  
Horden Richard 211  
Horsholm 214  
Housing Corporation 34  
HQE - Haute Qualité Environnementale 54

## I

IARC (Associazione Internazionale per la Ricerca sul Cancro) 82  
ICE - Inventory of Carbon & Energy - Version 1.6a 60, 61, 123, 136  
IDEMAT 60, 69  
iiSBE - International Initiative for a Sustainable Built Environment 54  
IMPACT 2002+ 79, 84  
Inghilterra 211  
INIES 31, 60, 63, 124, 144  
INIES – Declaration Environnementale et Sanitaire Conforme A La Norme NF P 01-010 62  
Institut Bauen und Umwelt e.V. 63, 64

Intergovernmental Panel on Climatic Change 74  
Interoperability BIM Pag. 9  
ISO 13370:2007 143  
ISO 13786:2007 143  
ISO 14020 30  
ISO 14025 30  
ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations 79  
ISO 14040 17, 23, 63, 79, 130, 160  
ISO 14040:2006 58  
ISO 14041:1998 58  
ISO 14042 83  
ISO 14042:2000 58, 73  
ISO 14043 87  
ISO 14045 79  
ISO 14045:2006, EPD 23  
ISO 14683:2007 143  
ISO 15686 Pag. 27, 29, 31  
ISO 15686-7 49  
ISO 15686 - parte 1 48  
ISO/CD 15686 – parte 1 50  
ISO 21930 30, 79  
ISO 21930:2007 79  
ISO/DIS 15392 “General Principles” 79  
ISO TR 14025 79  
Italia Pag. 22, 214  
IVAM 69, 162  
IVAM LCA Data 4.04 60

**K**

Kengo Kuma 209  
Kornmann Michel 32, 39, 124  
Kobe Pag. 21  
Kronsberg 103, 105

**J**

Johannesburg 83  
JRC-IES - Directorate-General Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability 60

**L**

LCI - Life Cycle Inventory 58, 69, 96, 106, 162, 179  
Lee Cherry 211  
LEED - Leadership in Energy and Environmental Design 26, 54  
LEED Canada Durability Credit MR 8 Pag. 26  
Life Expectancy of Building Components 34  
Linz 112, 113, 113, 114, 116, 117, 118, 119, 119  
Lodi 211  
Londra 101, 103

**M**

M-CH House 211  
Maldonado Tomàs 5  
Mangrove Hall 101, 101, 102, 105  
Mart de Jong e De Vijf 211  
Minihäuser Japan 210  
Modern Tea House 209  
Monier 30  
More with less 214, 215  
Museo delle Arti Applicate a Francoforte 210  
MV - Associazione Inquilini 31

**N**

NAHB 33  
Nardi Guido 1  
National Association of Home Builders 33  
Neutra Richard 5  
Nicholas Lacey & Partner, 211  
Nielsen & Rubow, 214  
Nokia Corporation VI  
Nuova Zelanda 22

**O**

ODP - Ozone Depletion Potential 74, 94, 108, 161  
Österreichisches ökologie Institut 34  
OFQC "Invecchiamento degli elementi da costruzione e costi di manutenzione, dati per la ristrutturazione di edifici residenziali" 34  
Olanda 211, 216  
Ontario Housing Corp. 34

**P**

Paesi Bassi 21, 101  
Photochemical Oxidation 94, 108, 161  
Piano Renzo 21  
Pianura Padana 38  
Politecnico di Milano 132, 163  
Poombeek 216  
Pré Consultant 60  
Procter & Gamble VI  
Protocollo di Montreal 98  
Protocollo italiano ITACA 54, 135

**R**

Rangoon 37  
RECAST 31/2012/CE IV

Reg. Lombardia 143  
Responsive Architecture 9  
Reykjavik 37  
Regenswald 103, 104  
Revision of the EPD system into an International EPD 96

## S

Savorelli A. Studio Solarch 214  
Santiago del Cile 209  
Scandinavia 22  
SERT - Sustainable Energy Research Team, Dept. of Mechanical Engineering 60, 123, 136  
S.E.N. - Servizio Energetico Nazionale 198  
SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry 58, 74, 83  
SETAC/UNEP Life Cycle Initiative 83  
Sima Pro 43, 44, 70, 72, 76, 86  
Sima Pro 7.1 96, 106, 107, 110, 111, 162  
Social Housing 103, 105, 112, 113, 113, 114, 115, 117, 118  
Società dell'industria plastica 98  
SOCOTEC 31  
Soltag energy Housing 214  
Space Box 211, 213  
Stelo P.P. 214  
Svezia 161  
Svizzera 31, 85  
Swedish Environmental Management Council (SEMC) 96  
Swiss Centre for the Life Cycle Inventories 60

## T

Tokyo, Giappone 209  
Total Quality 54  
Toyota Motor Corporation VI  
Tricesimo, Udine 214  
Triplo Zero Pag. 10

## U

UBA 58  
UCPTE - Unione per la Coordinazione della Produzione e del Trasporto dell'Elettricità 71  
UNEP di United Nations Environment Programme 83  
UNI 10349:1994 142  
UNI 10351:1994 131  
UNI 11156:2006 27  
UNI 11257:2007 30  
UNI EN ISO 13786:2008 131  
UNI EN ISO 14025:2010 79  
UNI EN ISO 6946:2007 131, 132  
UNI EN 12524:2001 132  
UNI EN 1990:2006 46

UNI EN 13306 47  
UNI ISO 14025:2006 23, 62  
Unione Europea 47, 55, 56  
Università di Bath 60, 123, 136  
University of Canterbury 22  
US Environmental Protection Agency 99  
US Patent no.11/430054 97

## **V**

Vajk Szokolay Steven 132  
Vector Foiltec 102  
Verlag Anton Puster Salzburg 210  
Villa Welpeloo 216, 217

## **W**

Wall House 209, 211  
Whitestone building maintenance and repair cost reference 33  
Whitestone research 33  
Wierer 30  
Willen Associates Architekten 103, 112  
William McDonough 218  
Wilson Gordon 103  
Working Group on LCIA 74

## **Y**

YLD - Years Lived Disabled 82  
YLL - Years of Life Lost 82

## **Z**

Zambelli Ettore 163, 165, 166  
Zumthor Peter 21  
Zurigo 60